

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

NÁVRH ŘEŠENÍ POTRUBNÍ SÍTĚ PROCESNÍ JEDNOTKY

DESIGN OF PROCESS UNIT PIPELINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR BUTEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RICHARD NEKVASIL, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Butek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh řešení potrubní sítě procesní jednotky

v anglickém jazyce:

Design of process unit pipeline

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na návrh a celkovou kontrolu potrubní sítě. Měla by být navržena nejvhodnější varianta řešení. Při kontrole bude použita norma ČSN EN 13 480.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Rozbor řešeného problému.
3. Návrh několika variant řešení potrubní sítě.
4. Pevnostní kontrola dle normy EN 13 480.
5. Napěťová analýzy vybrané části potrubí pomocí MKP.
6. Tvorba výkresové dokumentace.
7. Rozbor získaných výsledků řešení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Megson, T. H. G.: Structural and Stress Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000
- [2] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999
- [3] ČSN EN 13 480 – Kovová průmyslová potrubí
- [4] Křupka, V.: Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí, SNTL, Praha 1967

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

BUTEK PETR: Návrh řešení potrubní sítě procesní jednotky

Projekt, vypracovaný v rámci magisterského studia, objasňuje problematiku návrhu potrubního systému procesní jednotky. Návrh průmyslového potrubí často bývá dosti rozsáhlý a komplikovaný úkol, který je ovlivněn řadou faktorů a který může být řešen jen pomocí vhodných technických disciplín. Diplomový projekt je zaměřen na oblast pevnostní kontroly již navrženého potrubí dle normy ČSN EN. Stěžejní část výpočtu je zaměřena na posouzení vlivů provozních a zkušebních podmínek na nejvíce namáhané úseky konstrukce. Práce se rovněž zabývá vybranými aspekty, ovlivňujícími návrhovou koncepci i samotný pevnostní výpočet.

Klíčová slova:

Potrubí, Pevnostní výpočet, MKP, ANSYS, Caesar II

ABSTRAKT

BUTEK PETR: Design of process unit pipeline

The master's project deals with the pipeline systems of process unit. The design of the industrial pipeline is usually extensive and complex task interwoven with a lot of technical disciplines. Diploma thesis is focused on the strength calculation of the pipeline specified by the ČSN EN standard. The main goal of the calculation is appraisal of the most stressed parts under operating and testing conditions. The diploma thesis is handled with the key aspects that influence the overall concept of the pipeline design as well as the strength calculation.

Keywords:

Pipeline, Strength calculation, FEM, ANSYS, Caesar II

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUTEK, P. *Návrh řešení potrubní sítě procesní jednotky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 28.5.2008

.....
Bc. Petr Butek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Richardu Nekvasilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Děkuji rovněž svým rodičům za podporu a pomoc při studiu, Radku Gajduškovi za poskytnuté informace v oblasti výpočetní techniky a Ing. Arpádu Murovi.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ANOTACE..... | 3 |
| OBSAH | 7 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 9 |
| 1. ÚVOD | 10 |
| 1.1. Destilace v chemickém průmyslu | 10 |
| 2. HLAVNÍ ČÁSTI POTRUBNÍCH ROZVODŮ | 12 |
| 2.1. Trubky a tvarovky | 12 |
| 2.2. Spoje trubek..... | 13 |
| 2.2.1. Rozebíratelné spoje trubek | 13 |
| 2.2.2. Nerozebíratelné spoje trubek..... | 14 |
| 2.3. Armatury v potrubní technice | 14 |
| 2.4. Tepelná izolace potrubí..... | 15 |
| 2.5. Uložení potrubí..... | 16 |
| 3. ZÁSADY PROJEKTOVÁNÍ POTRUBNÍCH ROZVODŮ..... | 18 |
| 3.1. Základní veličiny určující potrubí | 19 |
| 3.1.1. Jmenovitá světlost, jmenovitý tlak a pracovní stupeň | 19 |
| 4. MATERIÁLY POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ | 20 |
| 4.1. Problematika volby materiálu | 20 |
| 4.2. Charakteristika použitého materiálu | 22 |
| 5. SVAŘOVÁNÍ V POTRUBNÍ TECHNICE | 23 |
| 5.1. Deformace a napětí při svařování | 23 |
| 5.2. Nedestruktivní svarové zkoušky..... | 24 |
| 5.3. Svařování Cr-Ni-Mo ocelí..... | 25 |
| 6. ÚVOD DO PEVNOSTNÍHO VÝPOČTU | 26 |
| 6.1. O programu ANSYS..... | 26 |
| 6.2. Pevnostní výpočet potrubí v programu ANSYS | 27 |
| 6.3. Tvorba geometrie potrubních větví | 28 |
| 6.4. Tvorba potrubní sítě v programu Workbench..... | 28 |
| 6.5. Zatížení a okrajové podmínky v provozním stavu..... | 30 |
| 6.5.1. Výpočet celkové tíhy potrubí..... | 31 |
| 6.5.2. Posuv hrdel zařízení v důsledku tepelné roztažnosti | 32 |
| 6.5.3. Celkové zatížení potrubních sítí..... | 33 |
| 6.6. Deformace potrubí v důsledku provozního zatížení | 36 |
| 6.7. Napjatost potrubí v důsledku provozního zatížení | 39 |
| 6.8. Kategorizace napětí | 42 |
| 6.8.1. Vratné potrubí spojující tepelný výměník a kolonu..... | 43 |
| 6.8.2. Vratné potrubí spojující kolonu s tepelným výměníkem..... | 44 |
| 6.8.3. Potrubí přivádějící páru do výměníku | 45 |
| 6.8.4. Potrubí odvádějící kondenzát z výměníku | 46 |

| | |
|--|----|
| 6.9. Vyhodnocení napětí v potrubí dle normy EN 13480..... | 47 |
| 6.9.1. Dovolená napětí potrubí dle normy EN 13480 | 47 |
| 6.9.2. Porovnání dovolených a vypočtených hodnot napětí..... | 48 |
| 6.10. Silové a momentové účinky na místa spojení potrubí a technologické jednotky | 49 |
| 6.10.1. Porovnání a vyhodnocení účinků na místa spojení..... | 49 |
| 6.11. Zkoušení potrubí | 51 |
| 6.11.1. Zkušební podmínky potrubí | 51 |
| 6.11.2. Napjatost potrubí při zkoušení | 52 |
| 6.11.3. Vyhodnocení napjatosti potrubí při zkoušení | 54 |
| 7. ANALÝZA POTRUBÍ V PROGRAMU CAESAR II | 55 |
| 7.1. Úvod k programu Caesar II | 55 |
| 7.2. Modelování potrubní sítě vařáku | 55 |
| 7.3. Zatížení a okrajové podmínky potrubí | 56 |
| 7.4. Deformace potrubní sítě v důsledku zatížení | 57 |
| 7.5. Napjatost v provozních a zkušebních podmínkách | 59 |
| 7.6. Vyhodnocení napětí kritických úseků | 60 |
| 7.7. Vyhodnocení silových a momentových účinků na místa spojení potrubí ... | 62 |
| 8. NÁVRH POTRUBNÍ SÍTĚ | 63 |
| 8.1. Uvažované místa změny uložení | 63 |
| 8.2. Návrh pružných závěsů | 64 |
| 8.3. Navržená potrubní síť..... | 66 |
| 9. ZÁVĚR | 68 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | |
| SEZNAM PŘÍLOH | |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Veličina | Název veličiny | Jednotka |
|-----------------------|---------------------------------|--|
| MIG | metal inert gas | [-] |
| MAG | metal active gas | [-] |
| WIG | wolfram inert gas | [-] |
| MKP | metoda konečných prvků | [-] |
| α | součinitel teplotní roztažnosti | [K ⁻¹] |
| E | modul pružnosti | [GPa] |
| μ | Poissonova konstanta | [-] |
| λ_t | tepelná vodivost materiálu | [W/m·K] |
| c_p | měrná tepelná kapacita | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| ρ | hustota | [kg/m ³] |
| σ | napětí | [MPa] |
| R _m | mez pevnosti | [MPa] |
| R _{p1,0} | smluvní mez kluzu | [MPa] |
| T _{provozni} | provozní teplota | [°C] |
| P _{provozni} | provozní tlak | [MPa] |
| T _{zkušebni} | zkušební teplota | [°C] |
| P _{zkušebni} | zkušební tlak | [MPa] |

1 ÚVOD

Potrubní doprava je nejvhodnější, nejrozšířenější a v některých případech i ojedinělý způsob přepravy pracovních látek. Tato technika je i přes své stáří neustále mladá a vyvíjející se [1]. Největší pokroky se zatím dosáhly v oblastech celkového návrhu i kontroly potrubí.

Potrubní systémy jsou komplexní technická zařízení, kterými lze přepravovat média plynné, kapalné i pevné. V současnosti se pro bezpečnou a spolehlivou dopravu pracovních látek využívá nejmodernějších poznatků a zkušeností z praxe spolu s dokonalou výpočetní technikou.

Součástí každého strojního zařízení jsou pevnostní výpočty. Ty jsou v současnosti řešeny pomocí nejmodernějších výpočtových programů. To přispívá k nižší časové náročnosti, ulehčení lidské práce a hlavně minimalizování lidského faktoru. Současně však dochází k vyšší přesnosti dosažených výpočtů, celkové technické úrovni i úspoře nákladů.

Otázka návrhu zařízení souvisí s celou řadou důležitých aspektů, které je nutné před výsledným návrhem vždy pečlivě zvážit. Jedná se o nejrozumnější problematiku zasahující do širokého okruhu strojírenství. Z tohoto důvodu je v této práci věnována pozornost nejzávažnějším problémům projektování průmyslového potrubí a názorně objasňuje jeho praktický význam.

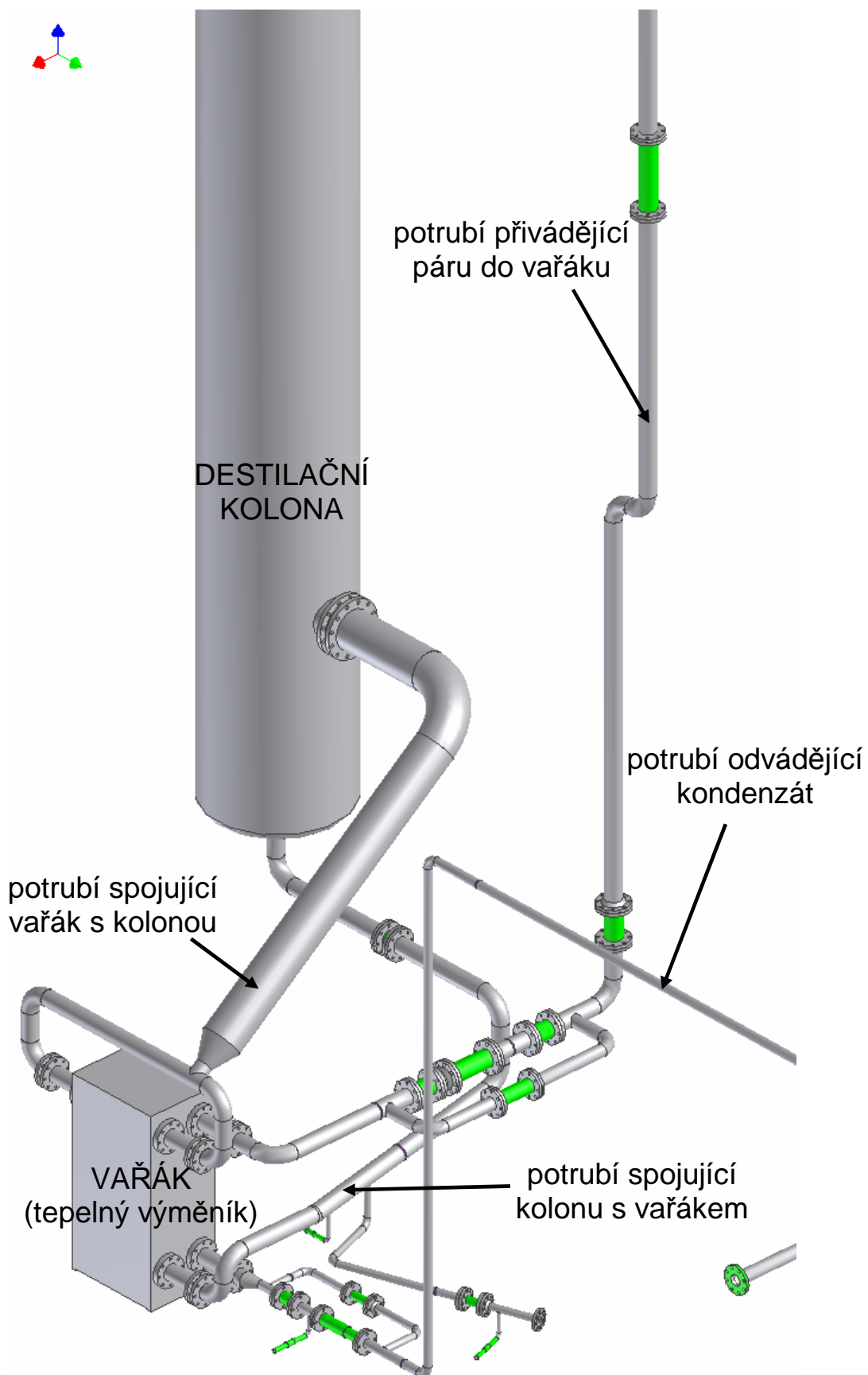
Hlavní část projektu je zaměřena na kontrolní pevnostní výpočet potrubního systému určeného pro chemický průmysl, jehož schéma je znázorněné na obr. 1.1. Součástí výpočtu je provedení napětově-deformační analýzy od provozních a zkušebních podmínek, které jsou následně vyhodnoceny podle normy ČSN EN 13480 vztahující se na průmyslová potrubí. Výpočet je nejprve proveden pomocí programu ANSYS a následně je stejný model vyřešen v profesionálním softwaru pro potrubní systémy Caesar II.

1.1 Destilace v chemickém průmyslu

Destilace je jednou z nejvýznamnějších technologií používaných v chemickém a petrochemickém průmyslu. Tento proces probíhá v destilačních nebo rektifikačních kolonách a dochází při něm k čištění nebo dělení převážně kapalných látek. Její podstata spočívá v rozdělení těkavých kapalin a kondenzovaných par v závislosti na různé těkavosti složek tvořících směs [16].

Součástí každé rektifikační kolony je vařák nebo též odparka. Jedná se o tepelný výměník, ve kterém probíhá var kapaliny za účelem zahuštění roztoku. Ohřáté médium se vrací do spodní části kolony, což umožňuje zlepšení tlakového spádu v koloně a udržení rovnováhy mezi kapalnou a plynnou složkou na jednotlivých patrech. Pro dosažení varu se často využívá topná pára [16].

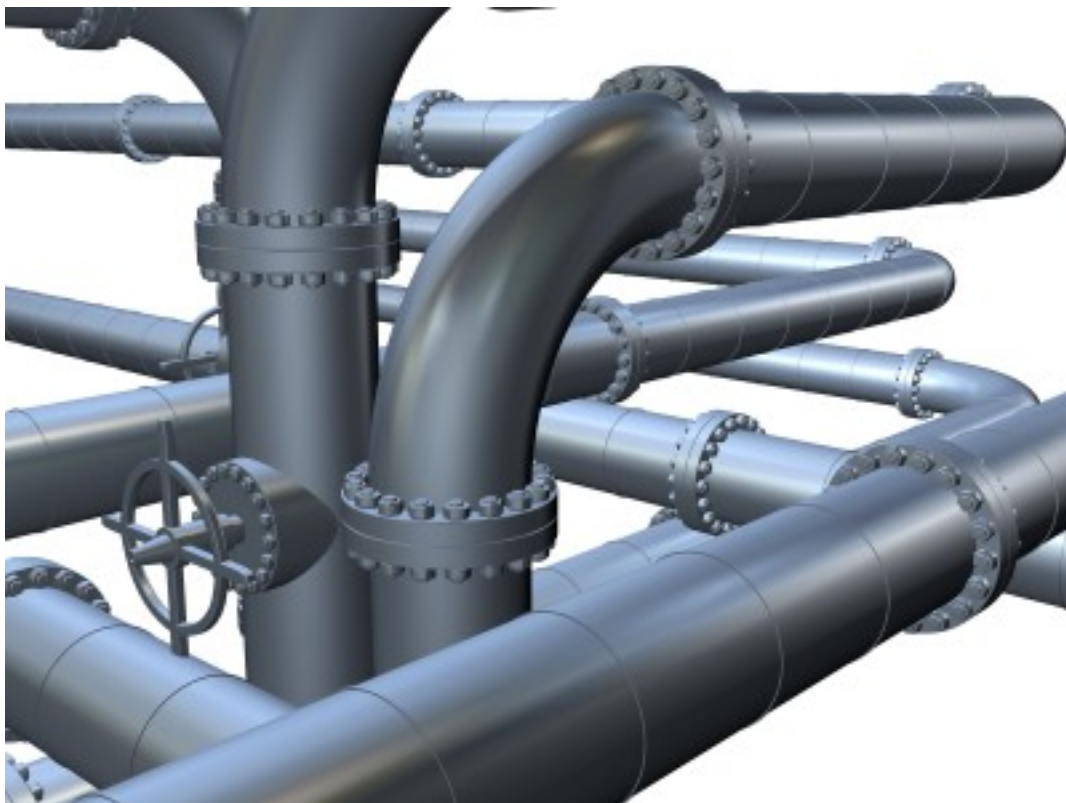
Potrubní systémy zajišťují spojení mezi tepelným výměníkem a destilační kolonou. V chemických závodech se z bezpečnostních důvodů kladou velmi přísné nároky na jednotlivé části technologie. Potrubní sestavy proto musí vyhovovat veškerým požadavkům, zajišťující minimální poruchovost.



Obr. 1.1: Schéma zadaného potrubního systému

2 HLAVNÍ ČÁSTI POTRUBNÍCH ROZVODŮ

Všechny potrubní systémy se skládají z jednotlivých částí, jejichž provedení a uspořádání jsou dány především účelem použití. Jsou rozeznávány dva typy těchto prvků: hlavní a doplňující. Hlavní části se vyskytují ve všech typech potrubí a jedná se zejména o trubky, potrubní spoje, tvarové prvky a upevnění. Doplňující části jsou voleny podle zvláštních požadavků a patří mezi ně různé typy armatur, ochranná, jistící, kontrolní a regulační zařízení nebo tepelná izolace [1]. Aplikace potrubní technologie v průmyslu je zobrazena na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Aplikace potrubního systému v průmyslu [17]

2.1 Trubky a tvarovky

Trubky jsou nejčtenější potrubní části, které svým rozsahem a hmotností významně ovlivňují celkové potrubní parametry. Tvarovky jsou nedílnou součástí každého potrubního rozvodu a slouží hlavně k dělení a spojování proudů, ke změně směru proudu, ale i k ukončení potrubí. Tyto prvky mohou být vyrobeny z ocelových i jiných (sklo, polyvinylchlorid,...) materiálů. Z důvodů vhodných mechanických vlastností se v průmyslu převážně setkáváme s ocelovými prvky. Ostatní materiály se v těchto oblastech vyskytují zřídka, a proto nebudou dále rozebírány. Ocelové trubky se nejčastěji vyrábějí jako bezešvé nebo svařované. Tvarové prvky bývají převážně svařované, lité nebo volně kované [15].

Trubky ocelové bezešvé jsou zpravidla válcované za tepla. Jsou normalizovány příslušnými normami, které určují jejich rozměry, hutní materiály pro výrobu, úpravy trubek a rozsah obvyklých délek (běžně 4 až 8 m). Tyto typy

se používají pro vysoké, střední i nízké tlaky, popřípadě i beztlaková potrubí (výfuky) a pro menší až střední světlosti [1].

Svařované trubky se vyrábějí z ocelových pásů, které se stáčí a následně tavně svařují. Sváry mohou být podélné nebo šroubovicové. Jsou normalizovány příslušnými normami, které určují rozměry svařované konstrukce, jakosti materiálu a rozsah obvyklých délek (běžně 6 až 8 m). Oproti bezešvým se používají pro potrubí větších průměrů. Z pevnostního hlediska jsou spíše určeny pro nižší až střední tlaky z důvodů jejich snížených mechanických vlastností způsobených svařováním [1].

V potrubní technice se nejčastěji setkáváme s tvarovkami typu T a Y. Svařované tvarovky jsou nejpoužívanější. Kované díly slouží pro natolik namáhané díly vnitřním přetlakem nebo tepelnou dilatací, kde by svařované konstrukce byly nevyhovující. Tvarovky lité se v současnosti využívají pouze v případech vysokých parametrů namáhání. Oproti svařovaným částem jsou složitější na výrobu a méně spolehlivé (vady odlitku) [1].

2.2 Spoje trubek

Všechny potrubní spoje jsou buď rozebíratelné nebo nerozebíratelné. Na volbu spojení má vliv především druh a parametry dopravovaného média. Spoje rozebíratelné jsou určeny k častému rozpojování a opětovnému spojování. Zpravidla vyžadují větší dohled a údržbu (z důvodů těsnosti, oprav). Jedná se hlavně o spoje přírubové, dále i šroubení nebo potrubní spojky. Nerozebíratelné spoje se používají v případech, v nichž by rozebíratelné byly z provozních důvodů nespolehlivé. Jsou využívány pro obtížně přístupné oblasti nebo spoje, které jsou určeny k trvalému provozu. Nejčastěji bývají svařované, lepené, závitové nebo pájené [15].

2.2.1 Rozebíratelné spoje trubek

Přírubové spoje jsou nejčastěji používané rozebíratelné spoje, které jsou normalizovány v širokém rozsahu [1]. Skládají se ze dvou přírub (přírubové desky), těsnění a spojovacích šroubů a matic (popřípadě svorníkových šroubů se dvěma maticemi). Příruby bývají pevné nebo točivé [15].

Pevné přírubové spoje využívají k svému uchycení svarových nebo závitových spojů. Nejčastější svary jsou koutové (pro ploché příruby se využívají dva koutové svary) a svary „na tupo“ (např. pro příruby s krkem). Závitové spoje využívají trubkového závitu a používají se zásadně pro spojování závitových trubek [15].

Točivé příruby jsou volně a otočně nasazeny na vhodně upravené konce potrubních částí. Opírají se o úhelníkovou obru, kroužek nebo obru s krkem, které jsou pevně spojeny s trubicí. Obruby a kroužky se uchycují, stejně jako pevné příruby, koutovými nebo tupými svary. Zpravidla se tyto spoje nepoužívají pro potrubí s proměnlivým tepelným režimem [15].

K dosažení dokonalé těsnosti spojů se používá těsnění. U těsnícího materiálu je nutné, aby vyplnil jak nerovnosti ploch, tak i svého povrchu. Toho se dosahuje potřebným měrným tlakem, jehož velikost závisí na kvalitě těsněných ploch, druhu těsnícího materiálu a na šířce a tloušťce těsnění. Těsnění se volí podle pracovního přetlaku, teploty a dopravovaného média. Mohou být nezapuštěné (hrubá čelní

plocha, hrubá nebo hladká těsnicí lišta) nebo zapuštěné (nákružek – výkružek, pero – drážka). Zapuštěné typy se používají pro větší pracovní tlaky [15].

Namáhání přírubových spojů za provozu nejvíce ovlivňuje napětí od šroubů, vnitřní přetlak, teplotní tok stěnou a silové a momentové namáhání vlivem tíhy tělesa a tepelného prodloužení potrubí. Napětí v desce příruby jsou především ohybová, ve šroubech vznikají přídavná napětí tahová. Utahování šroubů způsobuje i namáhání krutem. Převážně jsou však příruby namáhány ohybem a hlavní napětí se nachází v desce příruby [15].

Použitelnost těchto typů spojů je opravdu široká. Používají se pro libovolné průměry potrubí, nízké i vysoké tlaky (přetlaky) a teploty [15]. Široká konstrukční nabídka rozebíratelných přírub navíc umožňuje nalézt optimální výběr v závislosti na provozních okolnostech.

2.2.2 Nerozebíratelné spoje trubek

Hlavním typem nerozebíratelných potrubních spojů jsou spoje svařované. Spojovací svary se podle tvaru dělí na tupé a koutové a mohou uchytit dvě i více částí do jednoho celku. Tyto spoje využívají jak svařovací metody tavné, které využívá natavení a následného splynutí roztavených částí, tak i tlakové, kde je spoj vytvořen pomocí tlakového rázu [15].

Spoje lepené se používají pro spojování částí potrubí z plastických hmot, a to jak u spojů nerozebíratelných, tak i rozebíratelných. Klepení se používá vhodného lepidla, které je nanášeno na upravené lepené plochy (zdrsněné, očištěné). Lepené plochy z důvodu utěsnění musí k sobě dobře přilnout [15].

Kvůli obtížné demontáži dobře utěsněného závitového spoje se i tyto typy řadí mezi nerozebíratelné. Používají se pro ocelové závitové trubky, k připojení armatur, tvarovek a jiných. Vnitřní i vnější závity jsou normalizované. Jako těsnění se používá konopných nebo jiných vláken, různých tmelů, laků apod. [15].

2.3 Armatury v potrubní technice

V potrubní technice se nachází několik typů armatur. Nejčastěji používané armatury jsou uzavírací, regulační a bezpečnostní. Hlavní typy uzavíracích a regulačních armatur jsou ventily, šoupátka, kohouty a klapky. Rozdíl mezi těmito typy je v těsnosti, jenž je požadována v případech uzavíracích armatur. Regulační armatury zpravidla nejsou považovány za těsné. Těsnost uzávěru především závisí na stavu technických ploch, které by neměly být porušeny fyzikálními ani chemickými vlivy dopravovaného média, tlaku a teplotě. Bezpečnostní armatury se umísťují do technologie z důvodů ochrany uživatelů i samotného systému (pojistné ventily) [15].

Nejpoužívanější armaturou je v potrubní technice ventil. Při jeho volbě je důležité určit světlost a nejvhodnější charakteristiku vzhledem k účelu a systému, v kterém pracuje. Charakteristika ventilu je závislost průtočného množství na zdvihu ventilu a rozhoduje o ní typ armatury a tvar kuželky [1].

Pro přesné určení typu ventilu se používá metoda k_v součinitele, která je vhodná jak z hlediska zkoušení armatury, tak i z hlediska jeho volby. Snadno se měří a udává množství vody v litrech, které proteče armaturou za jednu minutu. Je dán vztahem, který je vyjádřen v rovnici 2.1 [1].

$$Q = k_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}$$

kde: Q – objemové průtočné množství [l/min]

k_v – součinitel k_v [-]

Δp – tlakový spád na ventilu [MPa]

γ – hustota protékajícího média [kg/m³]

Rovnice 2.1: Výpočet k_v součinitele

Obecně se armatury v pevnostním výpočtu charakterizují jako prvky dokonale tuhé (rigid). Pro zohlednění této vlastnosti se při modelování armatur zadává například větší tloušťka stěny nebo zvýšená tuhost prvku. Ve specializovaných programech (Caesar II) se těmto prvkům přímo zadává vlastnost rigid.

2.4 Tepelná izolace potrubí

Jedno ze základních kritérií vztahující se na potrubí je hospodárnost. Potrubní zařízení by bez použití tepelné izolace byla velmi nevhodná a v některých případech jen těžko uskutečnitelná (parní rozvody). Při vyšší teplotě média, než je teplota prostředí dochází k tepelným ztrátám, naopak při nižší teplotě pracovní látky může docházet k orosování povrchu. V případě malého rozdílu teplot je možné tuto hodnotu zanedbat [1].

Celkové ztráty tepla, respektive chladu, jsou vždy větší než množství procházející tepelnou izolací. K těmto hodnotám je zapotřebí uvažovat ztráty neizolovaných částí (armatury, přírubové spoje, uchycení) a zhoršení vlastností izolace v důsledku provozu (navlhnutí, stárnutí). Velikost přírážky zpravidla bývá 10 až 50 %, ve výjimečných případech i více [15].

Rovnice 2.2 udává vztah pro výpočet tepelné ztráty izolované válcové stěny. Z uvedené rovnice je patrné, že závisí na rozdílu teplot okolí a dopravovaného média, druhu a jakosti izolačního materiálu a na průměru potrubí a tloušťce izolační vrstvy [1].

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot \Delta t$$

kde: q – jednotková tepelná ztráta [W/m²]

α_1 – součinitel přestupu tepla [W/m²·K]

α_2 – součinitel přestupu tepla [W/m²·K]

λ – tepelná vodivost materiálu [W/m·K]

δ – tloušťka jednotlivé izolační vrstvy [m]

Δt – rozdíl teplot na obou stranách stěny [°C]

Rovnice 2.2: Výpočet tepelných ztrát izolované válcové stěny

Materiály tepelné izolace mají malou tepelnou vodivost a zpravidla i hustotu. Obě hodnoty závisí na druhu použitého materiálu a nalezneme je v příslušných technických dokumentech. V práci je uvažována hustota izolací jednotlivých potrubních tras 150 kg/m³.

Materiály potrubních izolací bývají obvykle anorganického původu. Nejčastěji se jedná o materiály na bázi vysokopecní strusky, minerální a čedičové vlny nebo skelné vaty. Další hojně užívanou skupinu tvoří izolační materiály tvarované:

výrobky z křemeliny, korkové výrobky nebo výrobky pěnové. Povrch tepelné izolace bývá opatřen ochranným obalem nebo pláštěm (např. pozinkovaný plech), který chrání izolační materiál před navlháním a různým poškozením [1].

Hospodářské požadavky se zaměřují na volbu tloušťky izolace. Ta by měla být pro součet investičních a provozních nákladů minimální. Investiční náklady ovlivňují materiálové položky, náklady na montáž a dopravu. Tyto náklady budou s rostoucí tloušťkou narůstat. Provozní náklady zahrnují náklady na krytí tepelných ztrát, údržbu nebo opravy. Tepelné ztráty s rostoucí tloušťkou klesají, a proto i celkové provozní náklady budou menší. Minimum křivky získané z investičních a provozních nákladů stanoví ekonomicky nejvýhodnější velikost tloušťky izolační vrstvy [1].

2.5 Uložení potrubí

Potrubí je nutné uložit a upevnit tak, aby zaujímal předem určený prostor, z kterého by v důsledku působení silových účinků nevybočovalo. Na základě těchto účinků je třeba přizpůsobit konstrukce uložení. Uložení musí zachytit nebo alespoň značně ztlumit kromě působících sil, i eventuální chvění, vibrace či rázy [15]. Podle pohybu potrubí v místě uložení lze dané typy rozdělit do následujících skupin:

- pevná uložení - zakotvení
- osová vedení a opěry potrubí
- podpěry a závěsy potrubí
- pružná uložení a závěsy

Potrubí je v zakotvení uloženo tak, že se nemůže pohybovat ani ve směru osy potrubí ani ve směru kolmém na osu. Rozděluje potrubí na jednotlivé kompenzační úseky. Zakotvení musí být dokonale tuhé, což znamená, že musí zachycovat nejen osově síly, ale v některých případech i pootočení vlivem krouticího a ohybového momentu [15].

Potrubí je k podložce zakotvení připevněno jedním až třemi třmeny z kruhové nebo ploché oceli, popřípadě i přivařeno. V závažných případech lze potrubí zajistit proti možnosti osového posuvu záložkami. Podložka zakotvení je připevněna k nosné konstrukci kotevními šrouby nebo přivařením [15].

Osová vedení dovolují pohyb potrubí ve směru osy a zachytávají síly kolmé k ose. Většina konstrukcí rovněž dovoluje i jeho pootočení. Osová vedení, které neomezují pohyb vodorovných potrubí ve svislém směru se nazývají osově opěry. Opěrné plochy obou typů uložení jsou k potrubí uchyceny objímkami nebo jsou přivařeny [15].

Podpěry jsou určeny k přenášení tíhy a svislých složek zatížení na nosnou konstrukci pod potrubím. Dovolují pohyb všemi směry ve vodorovné rovině. Převážně jsou však konstruovány pro pohyb ve směru osy. Potrubí, u nichž nejsou změny teploty velké se ukládají přímo na nosné kovové i nekovové podložky. U těžkých prvků s častými změnami teploty se trubky v místě uložení zesilují přivařenou příložkou. Potrubí s tepelnou izolací se opatřuje opěrnou plochou, vyčnívající nad povrch izolace, která je připevněna objímkami nebo přivařena [15].

Závěsy přenášejí tíhu svislé složky na nosnou konstrukci, umístěnou nad potrubím. Umožňují pohyb ve všech vodorovných směrech, především však v ose tělesa. Potrubí je uloženo v objímce nebo je k němu přivařeno závěsné oko. Objímka nebo oko jsou zavěšeny na táhle z kruhové oceli o přednastavené délce [15].

Pružné uložení se používá pro zavěšení potrubí se svislou složkou posuvu. Mezi nosnou konstrukci a potrubí se vkládá pružný článek, nejčastěji ocelová pružina, jejíž deformace umožňuje svislý pohyb, viz obr. 2.2. Pružiny bývají tlačné válcované z kruhového drátu nebo tažené válcované s oky. Konstrukčně nejjednodušší jsou pružné závěsy. Pružné podpěry jsou konstrukčně složitější a používají se pro útlum chvění potrubí. Při volbě předpětí pružiny se vychází ze dvou možných provozních stavů: pružina za provozu bude stlačována nebo odlehčována v důsledku teplotní dilatace svislých úseků. Předpětí se nastavuje zpravidla montážními přípravky nebo napínacími maticemi závěsné tyče. Při provozním zatížení je nutné pružné uložení sledovat a popřípadě napětí pružin upravovat [15].



Obr. 2.2: Pružinový závěs průmyslového potrubí [21]

3 ZÁSADY PROJEKTOVÁNÍ POTRUBNÍCH ROZVODŮ

Projektování potrubních sítí je důležitou součástí návrhového řešení. Při její realizaci se musí vždy dodržovat a respektovat určité zásady, které vedou k technicko – ekonomickému nejlepšímu výsledku. Hlavní zásady projektování jsou:

- provozní jistota
- hospodárnost navrženého potrubí, jeho provozu a obsluhy
- účelnost uspořádání s ohledem na montáž, provoz a obsluhu
- správně navržené potrubí z hlediska namáhání, dilatací a spojení

Stupeň provozní jistoty se volí s ohledem na vliv poruchy určité části (porucha armatury, netěsnost spoje nebo sváru,...) na spolehlivost celého systému. Ovlivňuje hospodárnost zařízení a pořizovací cenu. Potrubí, které by při poruše vyřadilo důležitá zařízení konstruujeme s nejvyšším stupněm. To znamená navrhnout jednotlivé části tak, aby provoz těchto jednotek byl možný i při poruše některého úseku. U nižších stupňů se už počítá s odstávkou porouchaných částí. [1].

V současné době je kladen důraz na minimalizování veškerých nákladů, a to jak nákladů investičních, tak nákladů provozních. Tyto veličiny rozhodují o době návratnosti investice, která musí být kratší než je životnost zařízení. Projektovaná životnost rovněž ovlivňuje pořizovací náklady. Dlouhodobě využívaným a provozovaným částem musí úměrně odpovídat pořizovací náklady. Krátkodobé trasy konstruujeme pokud možno úsporněji [1].

Jednou ze zásad účelnosti a přehlednosti celkového uspořádání je zachování pravidla umísťování potrubí v osách x, y, z k sobě kolmých. Armatury je nutné umístit co nejúčelněji z hlediska její funkce, provozu a dostupnosti. Ke všem důležitým částem by měl být dobrý přístup pro obsluhu z důvodů oprav nebo kontrol. Každá náročnější operace, ať už z důvodů obtížné přístupnosti nebo v důsledku dodatečné úpravy je nákladná [1].

Při návrhu potrubí je třeba zabezpečit celek proti ztrátě stability konstrukce v důsledku namáhání provozními podmínkami. Potrubní větve je nutné navrhovat tak, aby umožňovaly dobrou tepelnou roztažnost materiálu [1]. Dále je zapotřebí vhodně volit spojení jednotlivých částí, tvarové prvky, uchycení, izolace a vyhnout se příliš velkým tvarovým diskontinuitám. Konečný návrh by neměl způsobovat přídavné nebo zvýšené namáhání vlivem špatného technického provedení.

3.1 Základní veličiny určující potrubí

V potrubní technice jsou všechny důležité a nejčastěji používané části normalizovány. Základem potrubní normalizace jsou normy ČSN 130010 – jmenovité tlaky PN (Jt) a ČSN 130015 – jmenovité světlosti DN (Js). Tyto normy zajišťují ustanovení nejmenšího počtu technických řešení, které jsou z hlediska hospodárnosti, jakosti a bezpečnosti nejvýhodnější. Rovněž toto zavedení umožňuje ekonomické využívání konstrukčních materiálů, protože normalizované části jsou rozměrově stejné pro všechny pracovní stupně jednoho PN a obvykle i pro všechny druhy pracovních látek. Normy jmenovitých světlostí a tlaků platí i pro ostatní strojní zařízení na něž je potrubí napojeno (např. hrdla energetických aparátů) [15].

Vzájemnou souvislost jmenovitých tlaků a jmenovitých světlostí s rozměry příslušných částí potrubí (spoje, armatury, tloušťky stěn trubek atd.) určují příslušné rozměrové normy. V technických a výrobních podkladech musí být jednotlivé části označeny jmenovitou světlostí DN, jmenovitým tlakem PN a pracovním stupněm [15].

Jmenovité světlosti a jmenovité tlaky uvedené v závorkách se nesmějí používat pro nová potrubí. Volí se pouze ve výjimečných případech např. při mimořádných úsporách materiálu nebo celkových nákladů a musejí se vždy zdůvodnit. Příruby a armatury se však pro tyto údaje nevyrábějí [15].

3.1.1 Jmenovitá světlost, jmenovitý tlak a pracovní stupeň

Označení jmenovité světlosti určuje přibližnou velikost příslušných částí potrubí zpravidla ke vztahu k jejich skutečnému průměru [15], což je způsobené především výrobou trubky. Každá jmenovitá světlost je charakterizována určitým vnějším průměrem a mění se tloušťkou stěny. Všechny části, jejichž rozměry spolu souvisí se označují stejnou hodnotou DN. Při výpočtech je však nutné počítat se skutečnými hodnotami vnějších a vnitřních průměrů [1].

Kvůli sladění výroby a umožnění snadné volby součástí bez náročných výpočtů byla vytvořena řada jmenovitých tlaků [1]. Jmenovitý tlak je označení skupiny pracovních přetlaků odstupňovaných podle určených rozsahů pracovních teplot [15] a udává maximální pracovní přetlak, který daná součást snese při teplotách do 200°C. Při vyšších teplotách dochází k poklesu pevnosti materiálů. Pro tyto hodnoty je možné použít pouze maximální přetlaky nižší než je dané PN [1].

Pracovní stupeň je společné označení určitého rozmezí k sobě přiřazených pracovních přetlaků a pracovních teplot. Uvádí se společně s jmenovitým tlakem, a to ve tvaru zlomku (v čitateli je PN a ve jmenovateli pracovní stupeň). Je omezen nejvyšší a nejnižší pracovní teplotou spolu s nejvyšším pracovním přetlakem. Pracovní stupně určeny pro teploty nad 0°C se označují římskými číslicemi, pod 0°C velkými písmeny. Z ekonomických důvodů se většinou volí pracovní tlak a teplota co nejbližší maximálním hodnotám PN a daného pracovního stupně [1].

4 MATERIÁLY POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ

Materiály vždy zaujímaly významné postavení ve strojírenské výrobě. Rozvoj technických věd a výroby často byl, je a bude limitován vlastnostmi materiálů a technologiemi jeho zpracování. Právě materiály mohou být jedním z klíčů k inovacím v novodobém strojírenském průmyslu [4].

V dnešní době hovoříme o „zlatém věku materiálů“. V současnosti lze nalézt více než 40 000 různých polotovarů, které jsou projektantům, konstruktérům a dalším odpovědným specialistům plně k dispozici. Vybrat z takového množství údajů ten nejpříjemnější materiál „šitý na míru“ je nelehká úloha i pro ty největší odborníky. Správná volba materiálu je závislá především na teoretických znalostech, ale i zkušenostech z praxe [4].

Průmyslové potrubní systémy bývají často jedny z nejvíce zatížených částí jednotlivých technologií. Je to především způsobené různými druhy zatížení, která působí na daný prvek současně. To způsobí v tělese mnohem větší napětí, než jednotlivé primární účinky. Z tohoto důvodu by měly být potrubní materiály voleny s ohledem na všechny předpokládané typy zatížení.

Správná volba materiálu nám nejen zaručí dobrou odolnost proti jednotlivým zatížením, ale i úsporu hmotnosti (menší surovinová náročnost), spokojenost zákazníka s dobře vyřešenou problematikou respektive potřebný náskok před tvrdou konkurencí.

4.1 Problematika volby materiálu

Jedním z nejdůležitějších bodů při navrhování jakékoliv konstrukce je správná volba materiálu. Nalezení optimálních hodnot vlastností materiálů při vhodné cenové relaci je komplexní problematika, jejíž řešení ovlivňuje řada hledisek. Obecně platí, že čím je návrh komplikovanější, tím je specifikace užší a vzájemné působení mezi jednotlivými hledisky větší [4].

Výběr materiálů probíhá v několika stádiích. Nejprve se jedná o širokou skupinu, v které se pracuje s co největším množstvím údajů. Zvažují se různé koncepční varianty, které splňují základní pracovní podmínky a omezení. V další etapě se seznam zúží na případy, jež nejlépe vyhovují určitým specifickým požadavkům. V poslední kroku je detailní rozbor jednoho, případně několika alternativ, kdy se pracuje s nejpřesnějšími údaji o daných materiálech [4].

Za hlavní hledisko při výběru materiálu jakékoliv strojní součásti je skoro vždy považována pevnost. O konečném složení produktu však rozhodnou také další kritéria. Hlavní body ovlivňující volbu materiálu jsou: [4]

- 1) materiálové charakteristiky
- 2) technologie výroby
- 3) materiálové a výrobní náklady
- 4) další kritéria

ad 1)

Materiálové parametry potrubních systémů by měly vykazovat především dobré mechanické vlastnosti jako jsou pružnost, pevnost, plasticita nebo houževnatost, ale i další důležité charakteristiky, které vystihují daný proces např. odolnost proti korozi, odolnost proti teplotě, atd. [4].

Mechanické vlastnosti charakterizují chování materiálu za působení vnějších sil. Zjišťují se pomocí mechanických zkoušek. Pružnost je schopnost materiálu vytvářet před porušením pružnou deformaci. Pevnost označuje odpor proti deformaci a porušení vnějšími silami. Plasticita představuje schopnost materiálu zachovat trvalé deformace vyvolané účinkem vnějších sil a houževnatost udává odolnost proti křehkému lomu a je závislá na pevnosti a plasticitě. Odolnost proti korozi nebo vysokým teplotám jsou požadavky, které se často vyskytují v technické praxi. Většinou jsou řešeny pomocí vhodného materiálového složení nebo speciálních metalurgických operací [4].

ad 2)

Jedná se zejména o poznatky technologických vlivů na složení, strukturu nebo mechanické vlastnosti a podmínku realizovatelnosti dané technologie [4].

Technologické hlediska jsou považovány za určitý soubor fyzikálních a mechanických vlastností dovolujících za definovaných podmínek určitý způsob zpracování. Jedny z nejvýznamnějších technologických vlastností v potrubním oboru jsou svařitelnost a tvařitelnost. Svařitelnost je schopnost daného materiálu vytvořit kvalitní svarový spoj. Často je tato vlastnost uvedena v materiálových listech nebo normách a rozlišuje se na svařitelnost zaručenou, zaručenou podmíněnou, dobrou a obtížnou. Tvařitelnost udává schopnost materiálu vytvořit jakostní výrobek plastickou deformací, ať už za tepla nebo za studena. Nejpoužívanější operace využívané v potrubí jsou tažení a ohýbání [4].

ad 3)

Ekonomika je v dnešní době velmi důležitá oblast, která stále více ovlivňuje současnou výrobu. I ten nejlepší výrobní proces bez ekonomické a finanční kalkulace by byl jen těžko realizovatelný. Netýká se jen ceny zvoleného materiálu a použité technologie zpracování, ale i celé řady dalších aspektů jako jsou: životnost součástí (časté výměny jsou spojeny s prostoji a odstávkou výroby), povrchové úpravy nebo náklady na dopravu. Na otázku, zda se vyplatí použít levnější nebo dražší materiál však neexistuje obecný návod. Proto v této problematice hraje obrovskou důležitost zkušenost z praxe a detailní analýza dané situace [4].

ad 4)

Další důležité faktory, které se při volbě zohledňují jsou například ekologičnost (dopad zvoleného materiálu na životní prostředí), znalosti zatížení (statické, dynamické, cyklické,...) nebo charakteristika prostředí, v kterém se bude součást nacházet. Tyto charakteristiky pomáhají lépe vybrat požadovaný materiál [4].

4.2 Charakteristika použitého materiálu

Specifikovaný materiál potrubního systému je austenitická chrom-nikl-molybdenová (Cr-Ni-Mo) ocel. Austenitické materiály mají vynikající korozní odolnost v oxidačním prostředí, které se dají regulovat přidáním molybdenu. Jedná se o středně až vysoce legovanou kvalitní nerezovou ocel s velmi dobrou svařitelností, která je udávána všemi obvyklými postupy a mimořádně dobrou tvařitelností. Má výbornou plasticitu a houževnatost, což jsou základní předpoklady pro vysoce namáhané prvky, jakým bezesporu potrubní systémy jsou. Legující prvky (Ni, Mo, Cr) se navíc podílejí i na zvýšení mechanických vlastností, především pevnosti a tvrdosti. V podmínkách, které vyvolávají mezikrystalovou korozi je odolná včetně svarových spojů při dlouhodobém působení zvýšených teplot do 350 °C. Pro homogenní strukturu se jako výsledné tepelné zpracování volí rozpouštěcí žíhání s ochlazením do vody [11].

Použitý materiál odpovídá požadavkům na vlastnosti polotovaru pro potrubní systémy. Jednotlivé specifikované charakteristiky jsou vhodné pro kompenzaci očekávaných způsobů statického zatížení. Ukázka austenitické korozivzdorné Cr-Ni oceli je zobrazena na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Ukázka korozivzdorné Cr-Ni oceli [18]

5 SVAŘOVÁNÍ V POTRUBNÍ TECHNICE

Svařování je jedna z nejvýznamnějších technologií zabývající se zpracováním kovových materiálů. Umožňuje vznik nerozebíratelných spojů, které jsou nedílnou součástí takřka všech průmyslových oborů. Ty se v technice používají i přesto, že jsou častým zdrojem iniciace trhlin a následných havárií, což dostatečně vypovídá o praktickém významu a důležitosti. V potrubní technice svařování nahrazuje konstrukce nýtované popřípadě odlitky nebo výkovky, což způsobuje úspory hmotnosti i pracnosti [13].

Svařitelnost materiálů závisí na jeho chemickém složení, tepelném a deformačním ovlivnění v místě spoje a příslušnou technologií svařování. Při volbě materiálu je potřeba vždy zvážit vzájemnou vazbu mezi základním materiálem, přídavným materiálem, použitou technologií a požadavky na pevnost spoje. Rovněž pro bezpečný provoz svařovaných konstrukcí je nutno brát zřetel na provozní podmínky, způsob namáhání, rozměr svaru a mechanické a fyzikální vlastnosti základního materiálu [13].

Vlastnosti přídavného materiálu by měly odpovídat co možná nejvíc vlastnostem základního materiálu. Čím více budou podobné, tím bude lepší vzájemná interakce i menší náchylnost k iniciaci trhlin a dalším poškozením. Vždy se však uvažuje s lepšími mechanickými vlastnostmi a větším procentem legur, neboť část z nich se při procesu odpaří. Vhodnost použití daného přídavného materiálu se udává jak v odborných firemních katalozích, tak i v normách (ČSN EN 440,...) [12].

Potrubí nejčastěji využívá svary tupé a koutové. Tupé spoje jsou nejvhodnější pro dynamicky namáhané konstrukce a dochází v nich k nehomogennějšímu rozdělení toku napětí. Koutové jsou z pevnostního hlediska slabší a pokud možno se provádí vždy dvěma svary, aby se vyloučil vliv ohybového momentu. Koncentrace napětí se vyskytuje zejména u kořene. U tlakových nádob se často setkáváme i s přeplátovanými svary [13].

Důležitým svarovým parametrem je jeho stupeň jakosti. Ten stanovuje přípustné velikosti vad pro jednotlivé svary v závislosti na destruktivních a nedestruktivních zkouškách, typu základního a přídavného materiálu, postupu svařování, svařovací metodě a pod. Je stanoven ve výrobní normě nebo jej stanoví návrhář podle požadavku na bezpečnost [13].

Výběr vhodné svařovací technologie je rozhodující prvek celého svařovacího procesu. Většinou by měla být známa už při návrhu spoje. Zpravidla volba svařovací technologie podléhá technologickým, konstrukčním a ekonomickým aspektům. Nejdůležitější vlastnosti svaru, které volbu ovlivňují jsou: druh základního materiálu, tloušťka a průřez sváru, svařovací poloha a jeho průměrná délka [14]. U potrubí se nejčastěji setkáváme s metodami svařování elektrickým obloukem pod tavidlem a v ochranných atmosférách (MIG, MAG, WIG).

5.1 Deformace a napětí při svařování

Neoddělitelnou součástí každého svařovacího procesu je vznik svarových napětí a deformací. Tato problematika je způsobena přívodem energie do místa svaru, což způsobí teplotní a deformační účinek na uvažovanou oblast [14].

Svarové spoje vždy představují v konstrukci nehomogenní část jak strukturou, tak mikroskopickou napjatostí. Svarové napětí vznikají v důsledku nestacionárního teplotního pole (teplota je funkcí polohy a času) v místě svaru a jeho blízkém okolí. Rozdělení teplot je závislé na fyzikálních vlastnostech materiálu, efektivním výkonu zdroje tepla a rychlosti svařování. V důsledku nerovnoměrného rozložení teplot ve fázích ohřevu a ochlazování vznikají časově proměnné napětí, která jsou při ohřevu v důsledku teplotní roztažnosti tlaková a při ochlazování naopak tahová. Tyto napětí obvykle přesahují mez kluzu a vyvolávají tak lokální plastické deformace, při kterých dochází k úbytku plastických vlastností. Deformace se v materiálu nešíří rovnoměrně. Jedná se o smršťování svaru ve všech směrech: příčném, podélném i úhlovém, což může ovlivnit mnohem širší oblast než jen samotný teplotní cyklus. Deformace se převážně určuje podle hustoty dislokací dané oblasti [14].

Svarová napětí a deformace spolu vzájemně souvisejí a navzájem se ovlivňují. Hodnoty meze únavy jsou pro svarové oblasti vždy menší než u běžného materiálu. Na jejich velikost a charakter má jednoznačně vliv celkové řešení konstrukce, která musí být vždy řešena s ohledem na svařování, použitou metodu a druh základního materiálu [14].

Existuje celá řada aplikací na snížení svarových napětí a deformací. Zatímco zbytková napětí ve svaru mohou přetrvávat, deformace jsou většinou nežádoucí a musí se úplně odstranit (mechanické rovnání, tepelné rovnání). Pro snížení napětí se nejčastěji používá žihání ke snížení zbytkového napětí. U tlakových nádob se rovněž využívá mechanického způsobu jednorázového nebo opakovaného přetížení konstrukce tzv. „stress test“. Obvykle se skládá z několika cyklů, mezi kterými klesne tlak až na nulu. Dochází přitom ke zvýšení vnitřního napětí v oblasti svaru, kde dojde k překročení meze kluzu, což způsobí relaxaci napětí plastickou deformací a zvýšení únavové pevnosti v této oblasti [14].

5.2 Nedestruktivní svarové zkoušky

Nedestruktivní svarové zkoušky představují širokou oblast zkoušení materiálu a výrobků bez jejich porušení. Umožňují zjišťovat jak povrchové a vnitřní vady, tak i poruchy za provozu. V současnosti jsou tyto zkoušky součástí výrobního procesu a často i podmínkou prodejnosti výrobku [14].

Základní dělení nedestruktivních metod je následující: [14]

- zjišťování povrchových vad: vizuální, penetrační a magnetické práškové
- zjišťování vnitřních vad: radiologické (prozařovací) a ultrazvukové
- zjišťování netěsnosti a metody akustické emise, které jsou určeny ke zjišťování vzniku a šíření trhlin.

Ke zjišťování vnitřních vad nejen ve svaru, ale i potrubí a jeho částí, se nejčastěji využívá prozařovací metoda. Její princip spočívá v interakci použitého pronikavého záření (rtg, gama) s hmotou kontrolovaného výrobku. Prošlé záření je následně zviditelněno za kontrolovaným výrobkem pomocí vhodného detektoru. Intenzita záření se snižuje úměrně tloušťce stěny tělesa a absorpčním schopnostem materiálu. Případné vady materiálu se vytvoří na profilu prošlého paprsku, u kterého můžeme analyzovat a zjišťovat typové a rozměrové charakteristiky poškození [14].

Nejrozšířenější metoda kontroly je založena na principu zachycení prošlého záření kontrolovaným předmětem na speciální fotografický film. Získá se tak trvalý záznam obrazu vnitřních vad výrobku – radiogram. Jeho výhodou je dobrá rozlišitelnost a možnost archivace, naopak nevýhodou je možnost hodnocení výsledků až za určitou dobu [14].

Vyhodnocení vad zobrazených na radiogramu se provádí dle příslušných norem. Vyhodnocením se rozumí určení druhu, velikosti, četnosti a vzájemné polohy vad, jehož závěrem je určení stupně jakosti svaru. K vyhodnocení se používají negatoskopy (prosvětlovací zařízení), které převedou rozdíly v optické hustotě na rozdíly jasu [14].

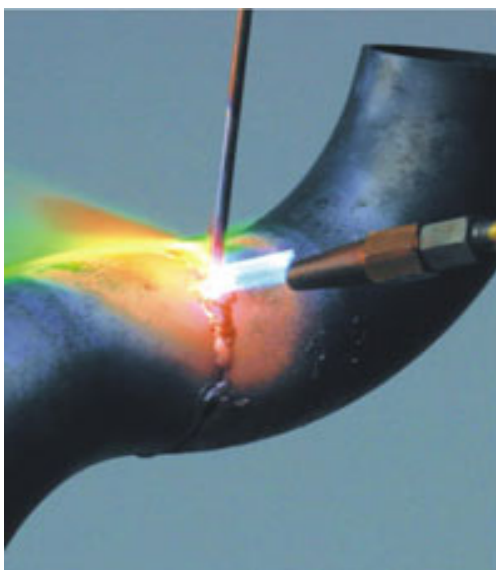
5.3 Svařování Cr-Ni-Mo ocelí

Problematika svařování těchto typů ocelí spočívá v tom, že mají až o 50 % větší tepelnou roztažnost a přibližně o 30 % nižší tepelnou vodivost než čistě feritické oceli. To se projeví především větší deformací a napjatostí v oblasti svaru. Dále jsou pak náchylné na tvorbu teplých trhlin při svařovacím procesu [12].

Dané svarové spoje se většinou tepelně nezpracovávají. U náročných a důležitých svarů se pouze předepisuje žíhání ke snížení zbytkového napětí nebo rozpouštěcí žíhání s následným ochlazením do vody [12].

Při svařování daného této oceli se často využívá předehřevu materiálu, popřípadě i dohřevu. To má za následek snížení rychlosti ochlazování, jak ve svarovém kovu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti, což přispívá k lepší kvalitě svaru. Dále je nutné hlídat tepelný příkon z důvodu možnosti zhrubnutí zrna a tudíž celkového zkřehnutí. Svařování oceli 1.4404 může probíhat ve všech polohách [12].

Pro svařování korozních chromniklových ocelí je nejvhodnější použít obloukové svařování obalenou elektrodou v inertní atmosféře argonu (MIG, WIG). Popřípadě je možné využít kyslíko-acetylenového plamene. Svařování potrubí metodou kyslíko-acetylenového plamene je zobrazeno na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Svařování potrubních oblouků plamenovou metodou [19]

6 ÚVOD DO PEVNOSTNÍHO VÝPOČTU

Pevnostní výpočet je jeden z nejdůležitějších nástrojů projektanta při navrhování a kontrole všech průmyslových zařízení, které se v jednotlivých technických aplikacích vyskytují. Tyto výpočty slouží k prevenci poruch, neobvyklých stavů, náhlých či neočekávaných jevů a dalších, jež by mohly mít v praxi nedožrnné následky. Pevnostní výpočty by proto měly být vždy řešeny s maximální obezřetností, s pečlivým uvážení všech možností působících zatížení, pracovních podmínek, dalších ovlivňujících okolností a předvídavostí k neočekávaným událostem.

Rozvoj této významné oblasti byl zapříčiněn především lidskou snahou o dokonalé poznání chování materiálu za určitých okolností. Díky mnohaletému vývoji je v současnosti pevnostní analýza jako vědní obor na velmi vysoké úrovni, i přestože jeho vývoj ještě zdaleka neskončil. Neustále se získávají nové poznatky podložené experimentálními výpočty, v důsledku moderní technologie jsou objevovány další souvislosti ovlivňující celkové řešení, dochází k neustálému prohlubování znalostí a k vývoji dokonalejších výpočetních metod.

Pevnostní výpočty lze rozdělit do několika kategorií. Nejdříve je potřeba rozlišit typ výpočtu: návrhový nebo kontrolní. Dále se rozlišují zařízení, pro které je výpočet určen (potrubní systémy, tlakové nádoby, čerpadla a armatury, přírubové spoje,...), různé druhy zatížení (statické, dynamické, teplotní), lokální podmínky (normy, národní standarty, klimatické podmínky) a další.

Pevnostními výpočty nejčastěji vyhodnocujeme napětově-deformační analýzu, únavu materiálu, stabilitu konstrukce, teplotní ovlivnění, odolnost proti seizmicitě, posuv aparátu a další druhy namáhání. Z praktických a časových důvodů se u daných konstrukcí vyhodnocují pouze ty stavy, které se podílí na zatížení daného prvku.

V současnosti jsou pevnostní výpočty řešeny pomocí výpočetní techniky. Jednotlivé výpočetní programy jsou buď univerzální nebo specializované. V diplomové práci, která se zabývá potrubním systémem, bylo využito obou typů těchto softwarů. Nejprve byl k pevnostnímu výpočtu použitý univerzální program ANSYS a následně specializovaný produkt na potrubní systémy Caesar II.

6.1 O programu ANSYS

Program ANSYS je v současnosti jeden z nejvíce rozšířených profesionálních softwarů řešících problematiku pevnostních výpočtů. Svým dlouholetým vývojem je právem označován za jeden z nejkvalitnějších a nejpropracovanějších produktů. Obrovskou výhodou tohoto programu je jeho univerzálnost, která zaručuje uživateli opravdu širokou oblast použití nejen ve strojních aplikacích, ale i v jakémkoliv technickém případě, jež je závislý na pevnostním výpočtu.

Program ANSYS pracuje na numerickém principu metody konečných prvků (dále jen MKP). MKP je nejpoužívanější numerická metoda, která se v mechanice využívá. Jednoznačně dominuje mezi moderními aplikacemi napětově-deformační analýzy, ale i v dalších úlohách inženýrských výpočtů, jako jsou proudění kapalin nebo vedení tepla [7].

Deformace a napjatost v obecné prostorové úloze představuje celkem 15 neznámých funkcí (posuvy v osách x , y , z , šest přetvoření a šest napětí), které společně s okrajovými podmínkami umožňují určení všech neznámých posuvů, napětí i přetvoření [8].

V oblasti mechaniky tuhých těles MKP umožňuje řešit následující typy úloh: [7]

- napěťově-deformační analýzu při různém typu zatížení
- úlohy na stabilitu konstrukcí
- vlastní i vynucené kmitání soustav
- kontaktní úlohy pružnosti (rozložení stykového tlaku)
- analýzu vedení tepla a určení teplotní napjatosti

Základní princip metody MKP spočívá v rozdělení tělesa na vhodný počet elementů, jejíž pevnostní analýza je poměrně snadná. V ANSYSu se tato metoda dělení nazývá meshování. Tato sekce dále nabízí např. výběr typu prvku (lineární, kvadratický), volbu velikosti elementu nebo jejich hustotu. Obecně platí, že čím náročnější bude volba těchto parametrů, tím bude kvalita výsledků lepší, ale doba řešení delší [7].

ANSYS umožňuje vytvořit model přímo v programu. Jedná se však spíše o jednodušší tvary, jež se v praxi příliš často nevyskytují. Pro vytvoření složitějších geometrií se využívá vhodných 3D programů, pomocí kterých se snadno a rychle dané těleso vymodeluje. Pro potrubní modely bylo využito programu Solidworks. Další využívané softwary jsou například Inventor, Pro-E, Catia.

Aplikace zatížení tělesa je nezbytnou součástí každého výpočtu. Veškerým prvkům je nutné zadat parametry materiálu (modul pružnosti, Poissonovo číslo) a okrajové podmínky (zatížení, vazby nebo teplota). Bez úplného zadání všech vstupních údajů nelze výpočet spustit (MKP neumožňuje řešit nepřímé úlohy) [7].

Poslední aplikace nabízí práci s výsledky (postprocessing = proces zpracování výsledků). Umožňuje znázornění neznámých parametrů, jako jsou rozložení napětí, celkové deformace nebo velikosti posuvů. Tyto výsledky jsou následně použity k analýze a prezentovány [7].

6.2 Pevnostní výpočet potrubí v programu ANSYS

Pevnostní analýza potrubní sestavy byla provedena pomocí specializovaného softwaru ANSYS Workbench. Jedná se o uživatelsky jednodušší prostředí programu ANSYS, který je od stejné společnosti ANSYS, Inc. Kvůli své názornosti a svému celkovému zpracování je tento program nejen vhodný pro projektanty a návrháře, ale i pro posluchače, kteří se snadno a rychle dostanou do složité problematiky.

Oba tyto produkty pracují na stejném základě. To umožňuje vzájemně kombinovat řešení určitých aplikací ve Workbenchu i ANSYSu. V diplomové práci bylo využito jak softwaru Workbench pro vyřešení celkového zatížení potrubí, tak i programu ANSYS při analyzování napětí nejzatíženějších částí jednotlivých potrubních větví.

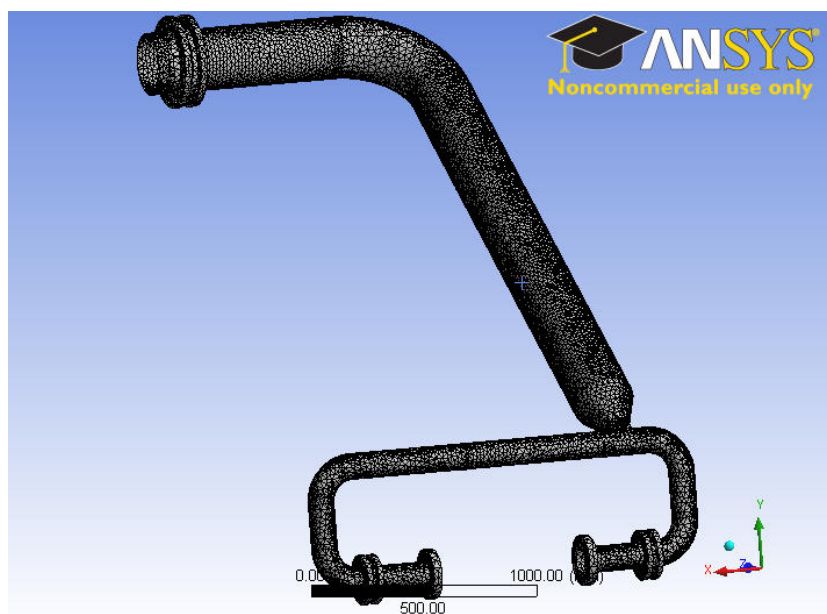
Nutno podotknout, že žádný z programů nezbaví uživatele odpovědnosti za vytvořený model. Při řešení praktických úloh jsou často aplikovány zjednodušení, které však nesmí vést k příliš velkému zkreslení výsledků. Je tedy potřeba mít vždy jasno jak v zadané problematice, tak i v principu řešení. Program vždy vyřeší zadanou problematiku, pokud nejsou vstupní data špatně zadána, avšak neposoudí správnost řešení [6].

6.3 Tvorba geometrie potrubních větví

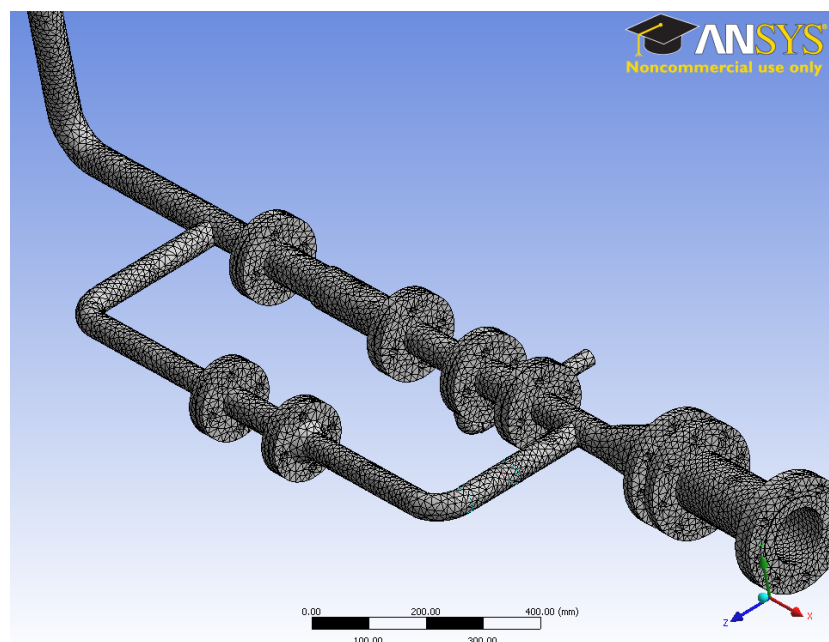
Pro tvorbu geometrie potrubní sítě bylo použito programu Solidworks. Veškeré potrubní data jsou přiložena v přílohách technických výkresů potrubí a jejich kusovnících. Vytvořené geometrie jsou následně převedeny do programů Workbench a ANSYS pomocí přípon IGS, x_t nebo SAT. Tento postup je často používán i v praxi.

6.4 Tvorba potrubní sítě v programu Workbench

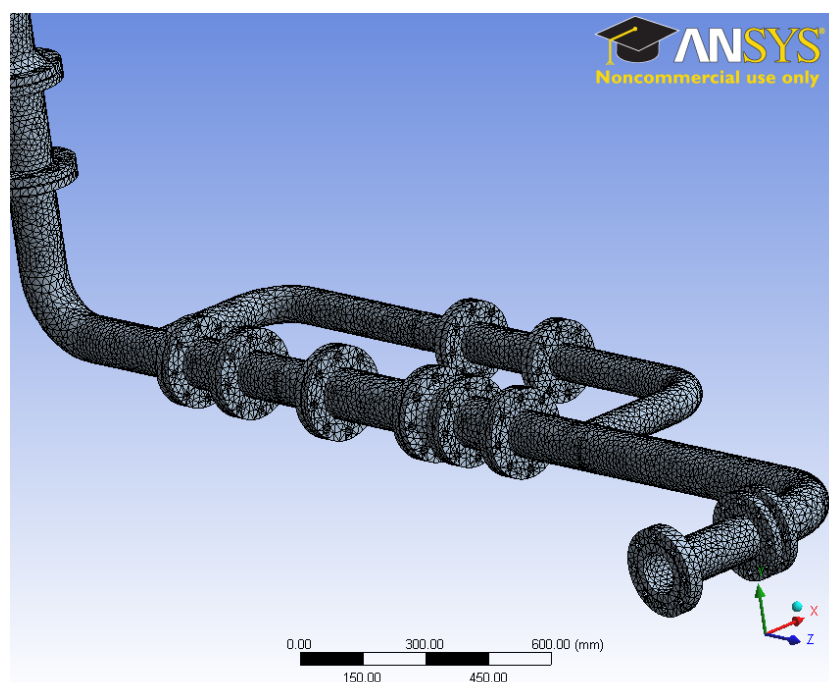
Základem řešení úloh v MKP je rozdělení daného tělesa na jednotlivé dílčí části, se kterými program pracuje. Workbench používá automatické algoritmy. Velmi rychle dokáže vygenerovat síť, přičemž jeho grafika zobrazení je přizpůsobena možnosti práce s velkými modely a složitými soustavami [9]. Většinou se tvorba sítě provádí automaticky s nastavením velikosti elementu. Důležité komponenty se navíc dají zjemnit, aby se dosáhlo co největší přesnosti výpočtů (ne vždy potřebujeme mít detailně síťované celé těleso). Ukázky výpočtových sítí potrubí, případně jejich detailů, jsou vykresleny na obrázcích 6.1, 6.2, 6.3, 6.4.



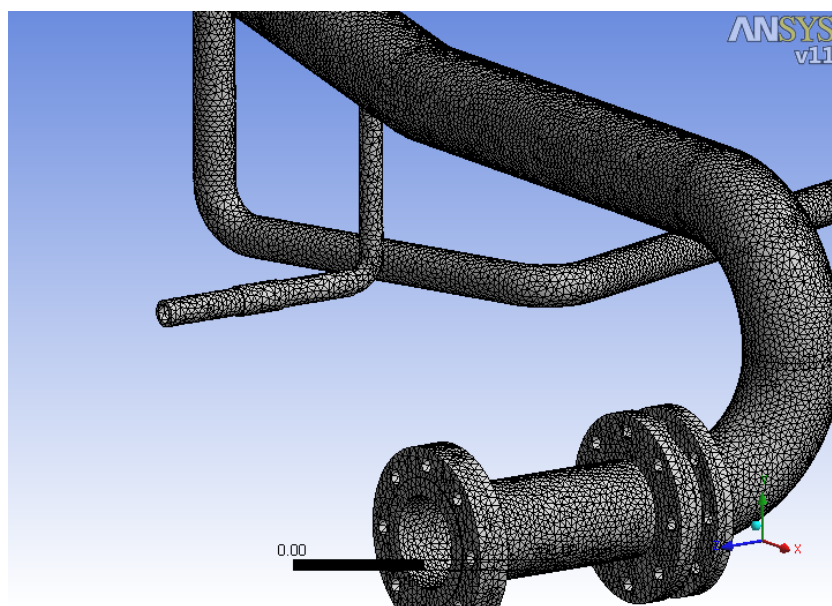
Obr. 6.1: Výpočtová síť potrubí spojující výměník s kolonou



Obr. 6.2: Spodní úsek výpočtové sítě potrubí pro odvod kondenzátu



Obr. 6.3: Spodní úsek výpočtové sítě potrubí pro přívod páry



Obr. 6.4: Spodní úsek výpočtové sítě potrubí spojující kolonu s výměníkem

6.5 Zatížení a okrajové podmínky v provozním stavu

ANSYS Workbench nabízí širokou škálu možností výběru jednotlivých typů zatížení. Díky tomuto výběru můžeme řešit úlohy statické i dynamické, tepelné úlohy s proměnnou nebo neproměnnou teplotou, kmitání, harmonické případy, výpočty pružnosti a další.

Potrubní systémy bývají v provozu namáhány mnoha typy zatížení. Z důvodů neuvažování dynamických účinků na konstrukci, zatížení větru, seismických účinků, kmitání ani dalších vlivů bylo pro výpočtové modely uvažováno pouze statické zatížení. Statické zatížení potrubního systému zahrnuje nastavení vnitřního přetlaku, posuvů hrdel potrubí spojující daný úsek s technologickou jednotkou, tíhy celého modelu (potrubí, média, izolace), provozní teploty média, která je pro jednoduchost uvažována v celém potrubí konstantní a materiálových vlastností oceli.

Hodnoty vnitřního přetlaku a provozní teploty jsou zadány. Tyto data jsou vyčteny z potrubních výkresů a vypsány v tab. 6.1. Ostatní podmínky, jako je tíha jednotlivých částí (média, izolace, potrubí) a posuvy potrubí způsobené teplotní roztažností technologických jednotek, musely být vypočteny.

| typ potrubí | $T_{\text{provozní}} [^{\circ}\text{C}]$ | $P_{\text{provozní}} [\text{MPa}]$ |
|---------------------------------|--|------------------------------------|
| spojující výměník s kolonou | 107 | 0,01 |
| spojující kolonu s výměníkem | 107 | 0,01 |
| přivádějící páru do výměníku | 143 | 0,045 |
| odvádějící kondenzát z výměníku | 100 | 0,045 |

Tab. 6.1: Hodnoty provozních teplot a tlaků jednotlivých potrubí

6.5.1 Výpočet celkové tíhy potrubí

Pevnostní výpočet v programu ANSYS nerozlišuje jednotlivé tíhy položek, které působí na danou součást. Tato problematika se v praxi řeší pomocí převodu jednotlivých hmotností na celkovou, která se následně zadává do výpočtu. V tomto případě se do celkové hmotnosti počítá tíha izolace, pracovního média a samotného potrubí.

Pro určení tíhy izolace je zapotřebí znát její rozměry a hustotu. Hustota izolace může být různá a záleží na typu materiálu. Pro výpočet byla zvolena hodnota 150 kg/m^3 . Tloušťky izolací jsou uvedeny v potrubní dokumentaci a jsou pro metanolové potrubní úseky mezi výměníkem a kolonou 50 mm, pro potrubí odvádějící kondenzát 60 mm a pro parní úsek 70 mm. Celková délka se určí z jednotlivých úseků na daných potrubních větvích. Jedná se pouze o přímé úseky. Místa přírub a armatur se z důvodů údržby a snadného přístupu neizolují.

U pracovního média je rozhodující jeho objem (protékaný průřez, celková délka potrubí) a hustota. Hodnota hustoty je zadána a protékaný průřez se pro zjednodušení uvažuje plný, tedy 100 % zaplnění.

Posledním parametrem je tíha samotného potrubí. Z materiálového listu byla zjištěna hodnota hustoty materiálu, která je 8000 kg/m^3 . Objem samotného potrubí byl zjištěn pomocí programu Solidworks.

Jednotlivé uvažované hmotnosti se sečtou a podělí objemem samotného potrubí. Výsledkem je hodnota celkové tíhy dané provozní jednotky. Výpočet celkové hustoty jednotlivých potrubí je naznačen v tab. 6.2.

| název | vratné potrubí výměník-kolona | | potrubí na odvod kondenzátu | |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| médium | voda-metanol | | voda | |
| hustota média | 956 | kg/m^3 | 922 | kg/m^3 |
| hmotnost media v potrubí | 230,9 | kg | 40,5 | kg |
| hmotnost izolace potrubí | 18,3 | kg | 19 | kg |
| hmotnost samotného potrubí | 203,7 | kg | 156,6 | kg |
| objem samotného potrubí | 0,025 | m^3 | 0,018 | m^3 |
| součet hmotností | 452,9 | kg | 216,1 | kg |
| VÝSLEDNÁ HUSTOTA | 17785,7 | kg/m^3 | 11766 | kg/m^3 |
| název | vratné potrubí kolona-výměník | | potrubí přivádějící páru | |
| médium | voda-metanol | | pára | |
| hustota média | 956 | kg/m^3 | 2,1 | kg/m^3 |
| hmotnost media v potrubí | 54,2 | kg | 0,5 | kg |
| hmotnost izolace potrubí | 11,3 | kg | 55,15 | kg |
| hmotnost samotného potrubí | 99,83 | kg | 426,6 | kg |
| objem samotného potrubí | 0,012 | m^3 | 0,057 | m^3 |
| součet hmotností | 165,4 | kg | 482,2 | kg |
| VÝSLEDNÁ HUSTOTA | 13251,9 | kg/m^3 | 8414,6 | kg/m^3 |

Tab. 6.2: Hodnoty výsledné hustoty potrubních sítí

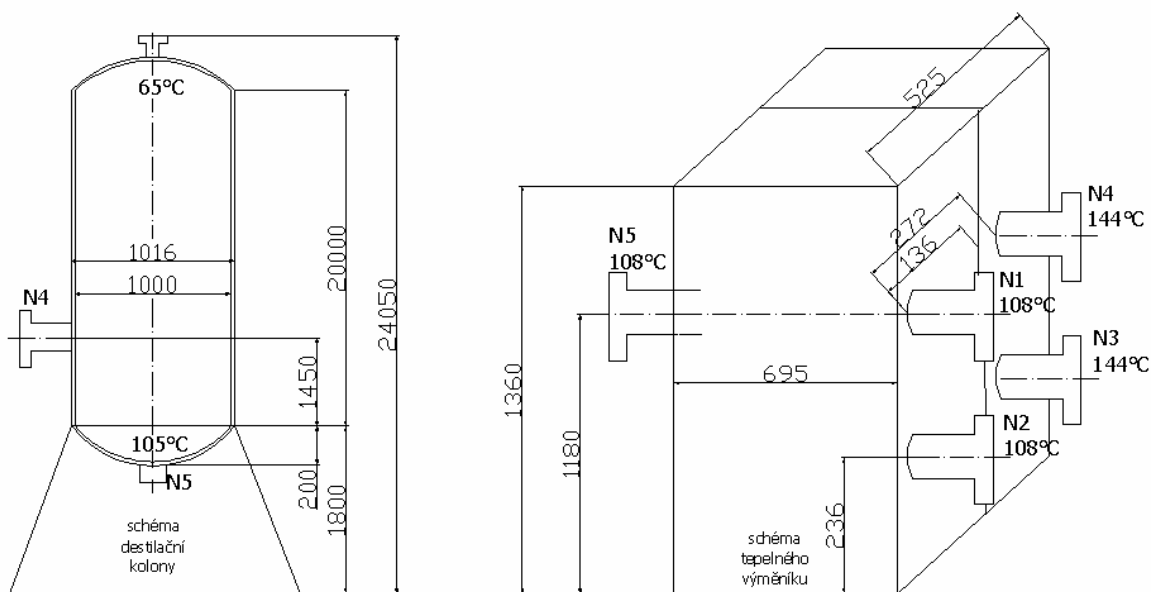
6.5.2 Posuv hrdel zařízení v důsledku tepelné roztažnosti

Potrubní systémy vždy představují spojovací prvek mezi určitými jednotkami, které jsou zpravidla pevně ukotveny. Vlivem zvýšené teploty dochází k nárůstu objemu zařízení a dochází tak ke změně původní polohy uchycení této jednotky s potrubím. V důsledku těchto posuvů dochází k deformaci potrubí a vzrůstu jeho napjatosti v místech spojů.

Jednotlivé posuvy se určují ze základní fyzikální rovnice: $\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$, kde α je součinitel teplotní délkové roztažnosti materiálu [K^{-1}], ΔT je rozdíl provozní teploty a uvažované teploty za normálních podmínek (20 °C) v [K] a L teplotně ovlivněná délka zařízení [m].

V práci se vyskytují dva typy zařízení, tepelný výměník a destilační kolona. Tyto jednotky jsou složité technologické aparáty, které pro teplotní výpočet využívají simulace speciálních počítačových programů. V praxi se však často hodnoty uvažovaných teplot v určitých místech zjišťují z aritmetických průměrů daných teplot, aproximací nebo inženýrským odhadem. Materiál obou zařízení byl uvažován z uhlíkové oceli, tedy součinitel teplotní délkové roztažnosti materiálu je $10,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Ze schématického znázornění technologických aparátů na obr. 6.5 lze vyčíst tepelně ovlivněné délky a uvažované teploty míst spojení potrubí s technologickou jednotkou. Z těchto údajů jsou vypočítány hodnoty posuvů potrubí v osách x, y, z (dx , dy , dz), jejichž velikosti jsou znázorněné v tab. 6.3.



Obr. 6.5: Schématický výkres destilační kolony a výměníku (vařáku)

| vratné potrubí spojující tepelný výměník s kolonou | | |
|---|---------|----------|
| <i>spojení potrubí a kolony</i> | dx (mm) | 3,9 mm |
| - hrdlo N4 | dy (mm) | 12,4 mm |
| | dz (mm) | |
| <i>spojení potrubí a výměníku</i> | dx (mm) | 2,846 mm |
| - hrdla N5 | dy (mm) | 4,832 mm |
| | dz (mm) | 0,557 mm |
| - hrdla N1 | dx (mm) | |
| | dy (mm) | 4,832 mm |
| | dz (mm) | 0,557 mm |
| vratné potrubí spojující kolonu s tepelným výměníkem | | |
| <i>spojení potrubí a kolony</i> | dx (mm) | |
| - hrdlo N5 | dy (mm) | 6,02 mm |
| | dz (mm) | |
| <i>spojení potrubí a výměníku</i> | dx (mm) | 2,846 mm |
| - hrdlo N2 | dy (mm) | 4,832 mm |
| | dz (mm) | 0,557 mm |
| parní potrubí vstupující do výměníku | | |
| <i>spojení potrubí a výměníku</i> | dx (mm) | |
| - hrdlo N4 | dy (mm) | 4,832 mm |
| | dz (mm) | 0,557 mm |
| potrubí pro odvod kondenzátu z výměníku | | |
| <i>spojení potrubí a výměníku</i> | dx (mm) | |
| - hrdlo N3 | dy (mm) | 0,966 mm |
| | dz (mm) | 0,557 mm |

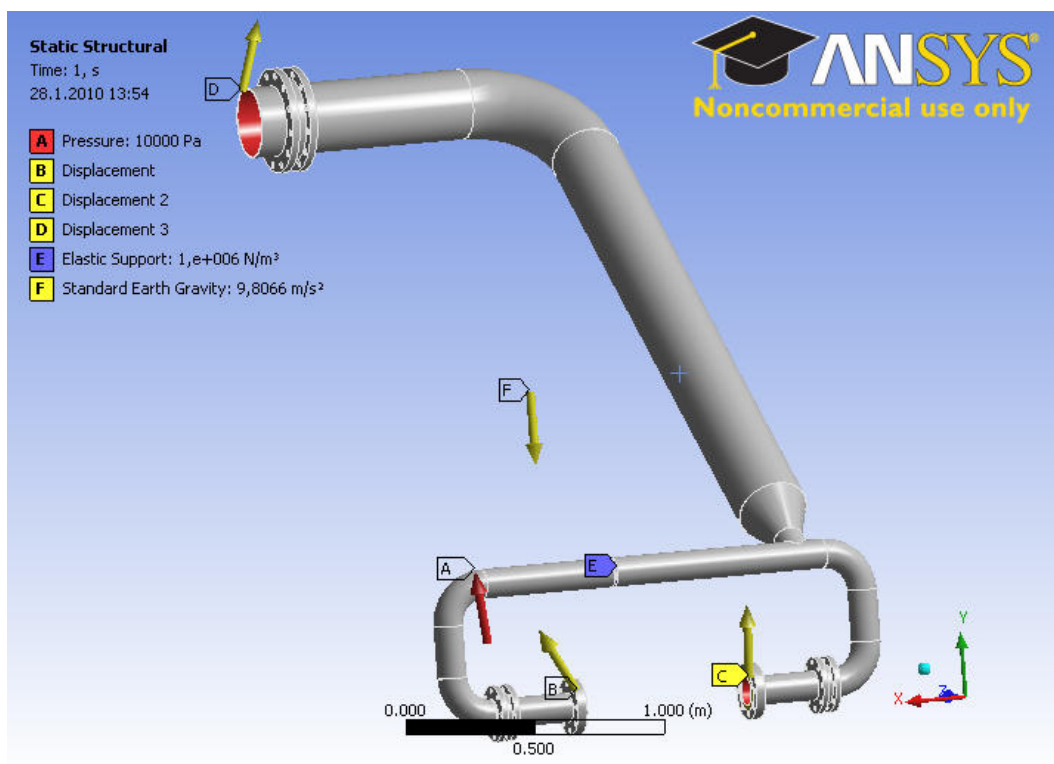
Tab. 6.3: Posuvy hrdel spojujících potrubí s výměníkem (kolonou)

6.5.3 Celkové zatížení potrubních sítí

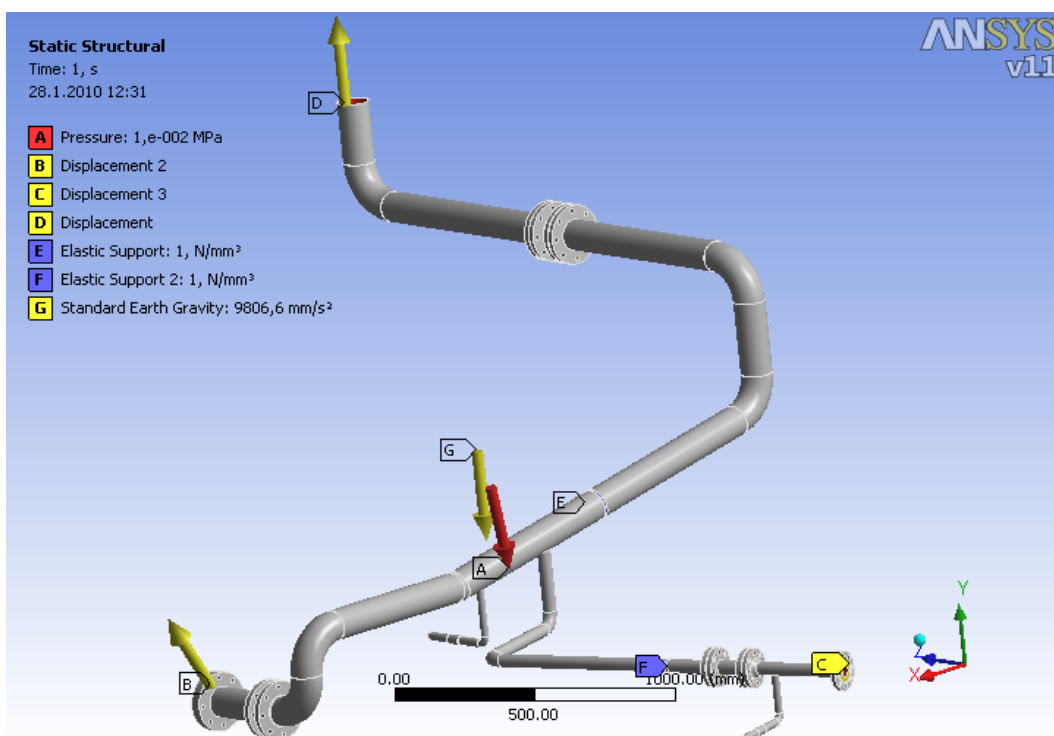
Výsledné zatížení jednotlivých potrubních tras se tedy bude skládat z udávaných provozních hodnot vnitřního přetlaku a teploty proudícího média, vypočítaných posuvů jednotlivých hrdel připojení k technologickým jednotkám, celkové tíhy a pružných uchycení potrubí.

Na obrázcích 6.6, 6.7, 6.8 a 6.9 jsou ukázány okrajové podmínky potrubí, které se uvažují pro pevnostní výpočet. Tyto hodnoty slouží jako vstupní data výpočtu pevnostní analýzy.

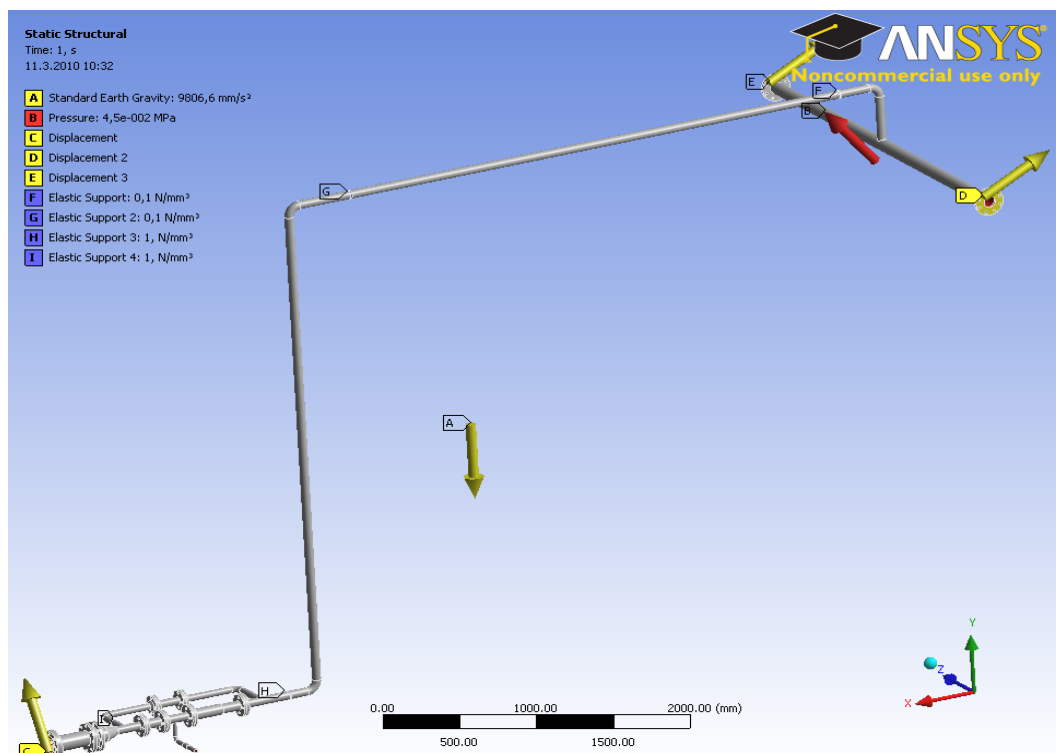
Každý model má přesně definované materiálové vlastnosti, které odpovídají použitému materiálu 1.4404. Jejich hodnoty jsou fyzicky nastaveny, avšak graficky se v daných obrázcích nezobrazují. Byly nastaveny materiálové hodnoty E , μ , λ_t , α , c_p , jež jsou získány z materiálového listu.



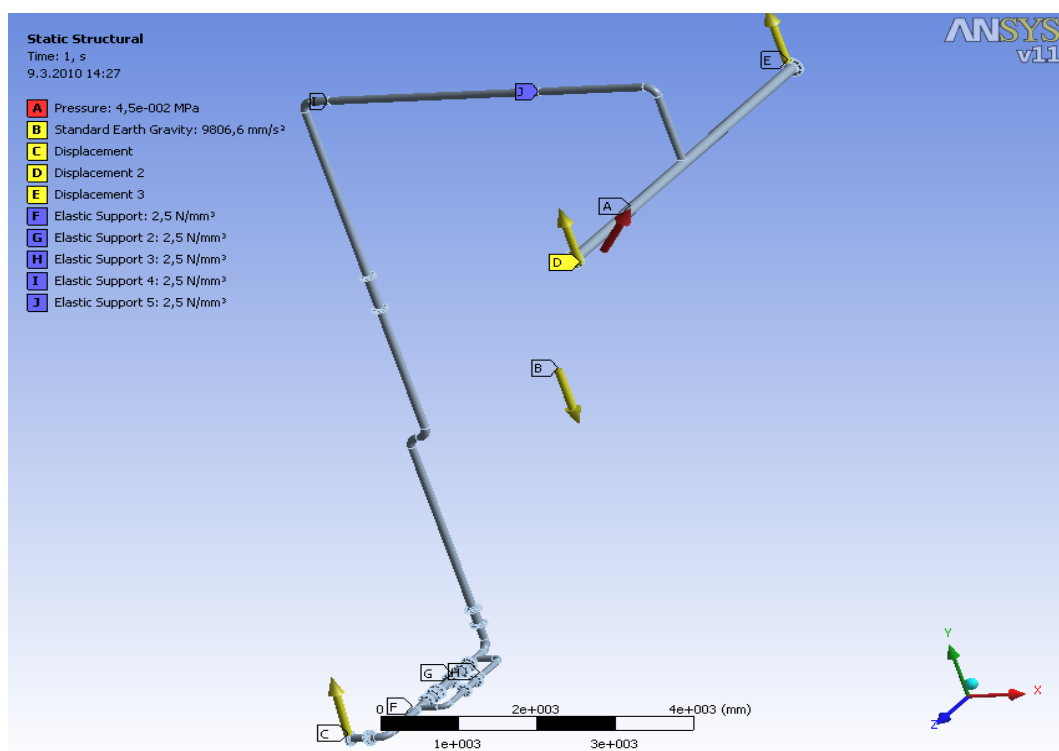
Obr. 6.6: Okrajové podmínky potrubní větve spojující tepelný výměník s kolonou



Obr. 6.7: Okrajové podmínky potrubní větve spojující kolonu s tepelným výměníkem



Obr. 6.8: Okrajové podmínky potrubní větve odvádějící kondenzát z výměníku



Obr. 6.9: Okrajové podmínky potrubní větve přivádějící páru do výměníku

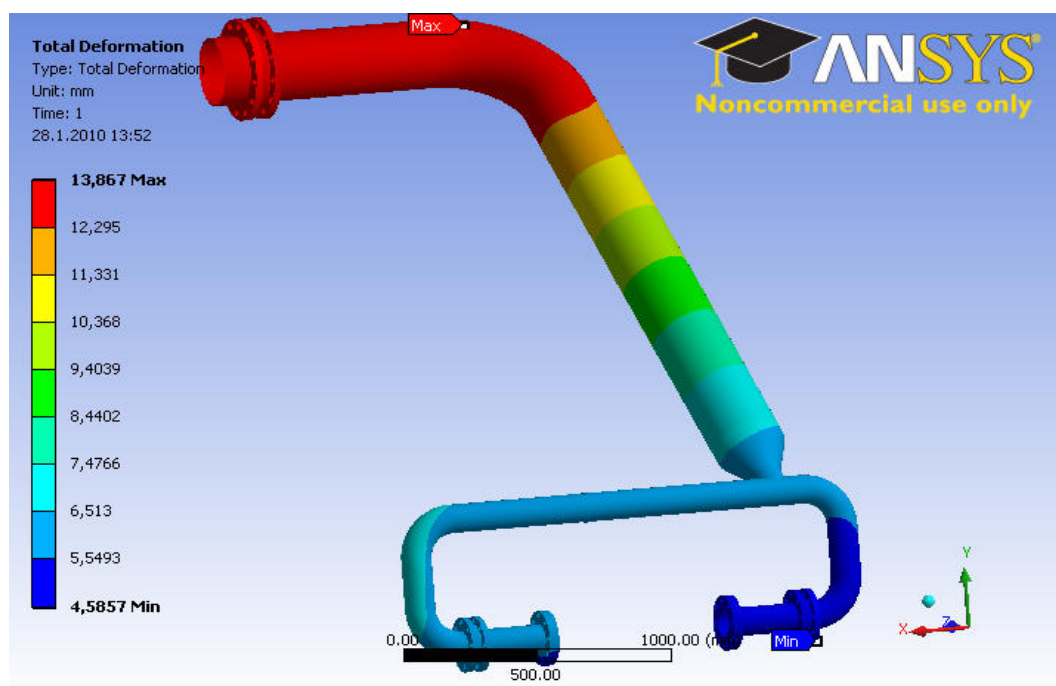
6.6 Deformace potrubí v důsledku provozního zatížení

K deformaci tělesa dochází v důsledku zatížení provozními podmínkami. V nejvíce deformovaných oblastech se mohou vyskytovat kritická místa, která mohou způsobit poruchu systému. Z důvodů dobrých materiálových vlastností (pružnost, plasticita) by však samotná deformace neměla zapříčinit poškození součástí. Trvalé poškození hlavně ovlivňuje napjatost v daném místě.

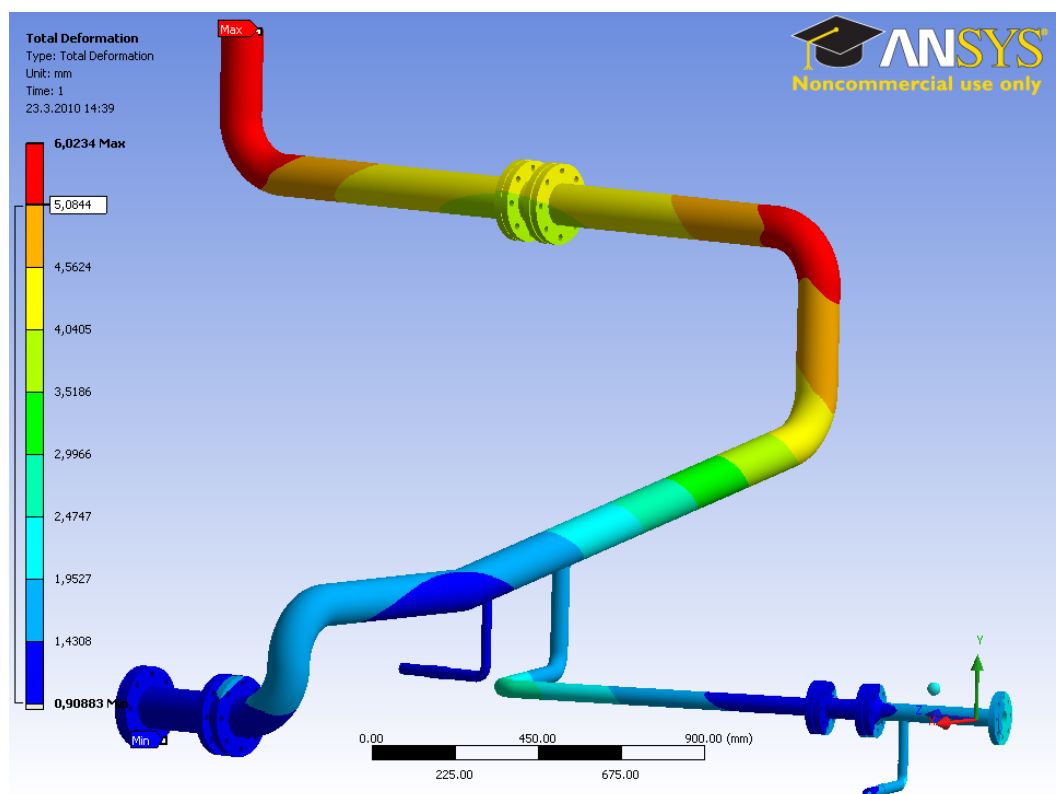
Při návrhu potrubní sítě se vždy uvažuje s její deformací. Deformované místa se považují za přijatelné, pokud jejich napjatost se nachází v pružné, případně v pružně-plastické oblasti. V opačném případě bude docházet k nežádoucím trvalým plastickým deformacím.

Z průběhů napětí v potrubních větvích (viz. kapitola 6.7) vyplývá, že v případě prvního deformovaného potrubí se zvýšené hodnoty napětí nevyskytují v oblasti maximální deformace. Tato deformace se tedy považuje za přijatelnou. V ostatních případech se však v oblastech maximální deformace rovněž vyskytují zvýšené hodnoty napětí. Pro posouzení těchto deformací proto musí být provedeno vyhodnocení napěťově-deformační analýzy (viz. kapitola 6.9.2).

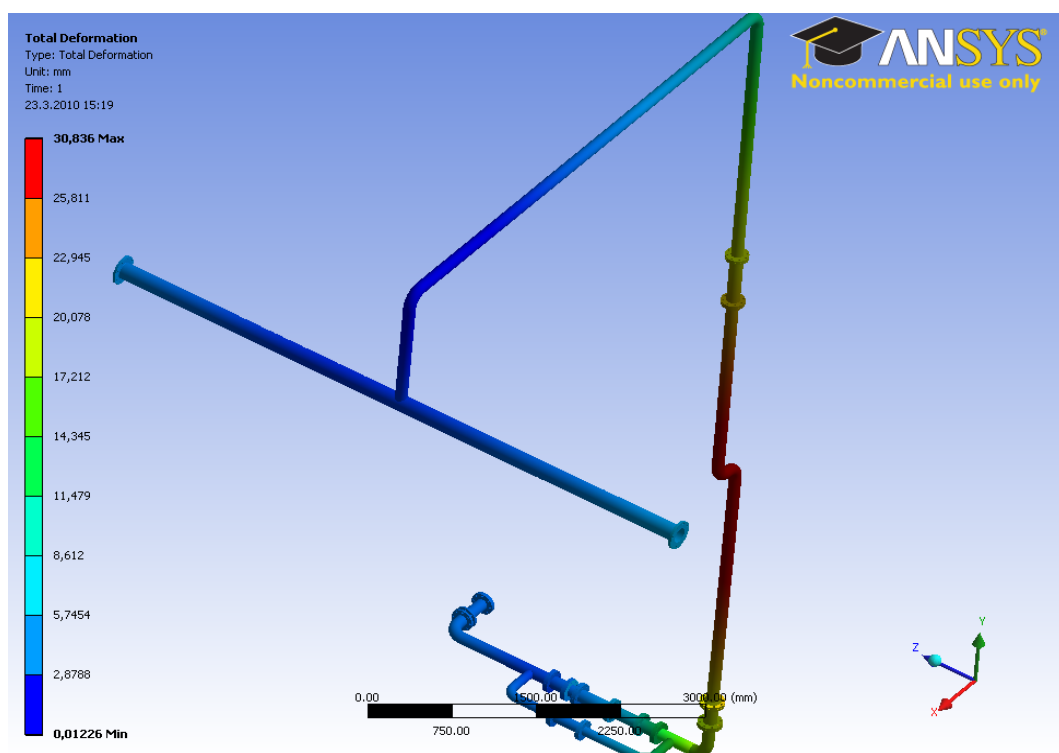
Výsledné deformace jednotlivých potrubních sítí v provozním stavu jsou znázorněny na následujících obrázcích 6.10, 6.11, 6.12 a 6.13. Barevné schéma názorně odlišuje místa podle intenzity zdeformování a přehledně tak poukazuje na nejvíce deformované oblasti.



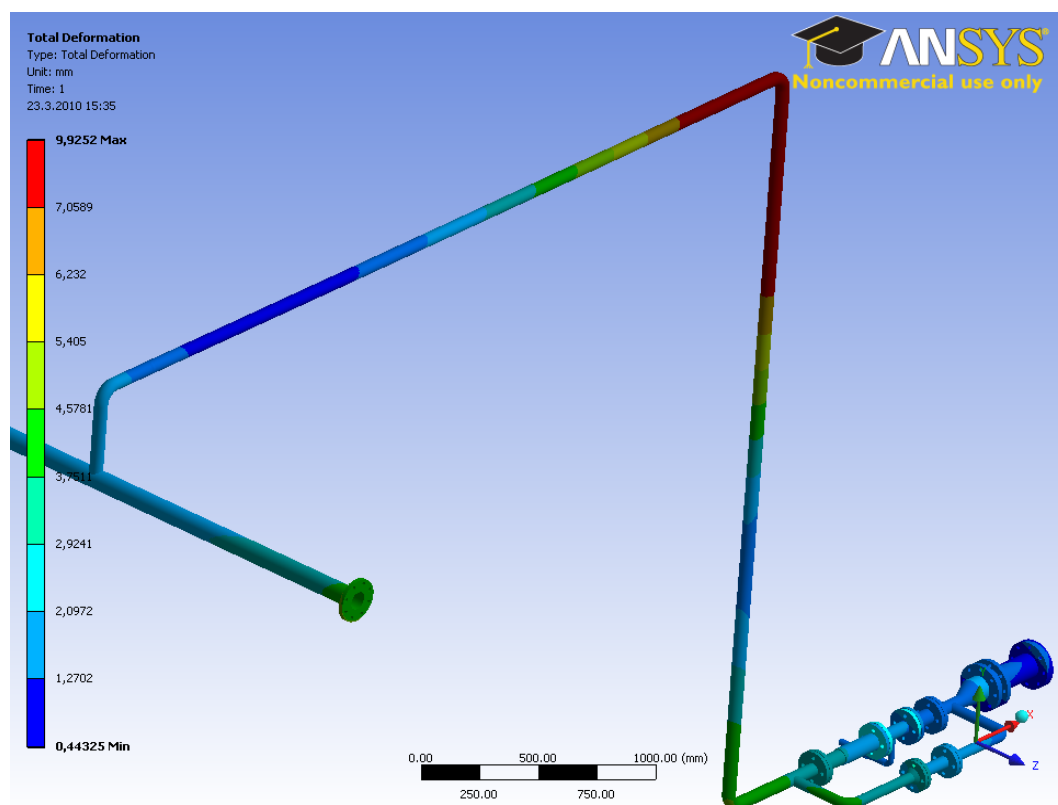
Obr. 6.10: Deformace potrubí spojující výměník s kolonou v provozním režimu



Obr. 6.11: Deformace potrubí spojující kolonu s výměníkem v provozním režimu



Obr. 6.12: Deformace potrubí přivádějící páru do výměníku v provozním režimu



Obr. 6.13: Deformace potrubí odvádějící kondenzát z výměníku v provozním režimu

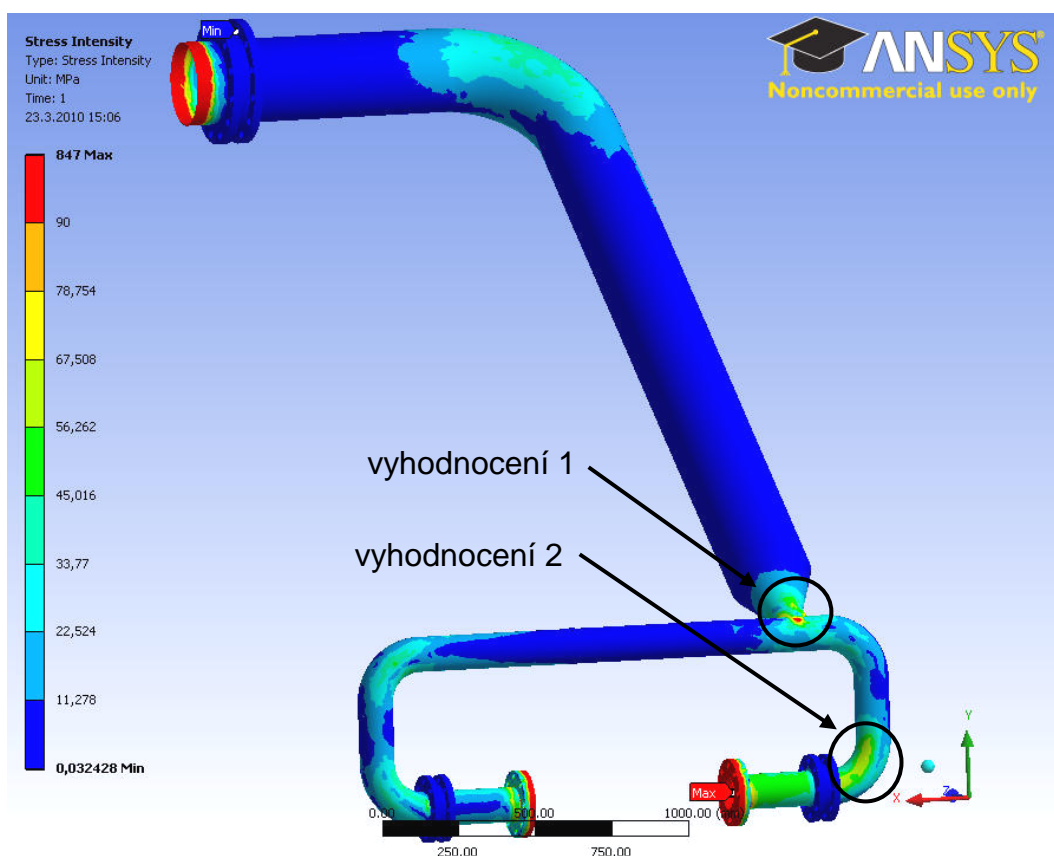
6.7 Napjatost potrubí v důsledku provozního zatížení

Potrubní napjatost představuje nejvýznamnější parametr pevnostního výpočtu. Napjatost charakterizuje odezvu příslušného tělesa na zatížení od okrajových podmínek a vnějších sil. Nejvýznamnější parametry ovlivňující velikost napětí jsou provozní podmínky a charakteristiky materiálových vlastností (E , μ , α , ...).

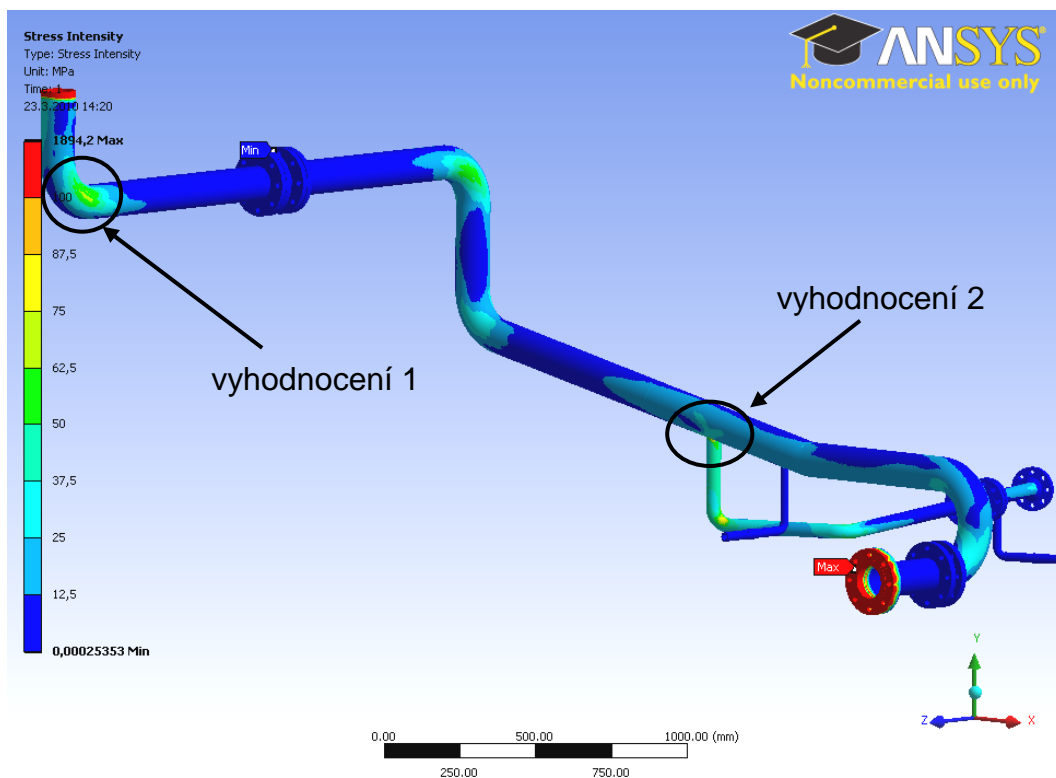
Napjatost konstrukce by se při provozním zatížení měla vždy nacházet v pružné, respektive v pružně-plastické oblasti. V těchto oblastech je možné relativně přesně popsat chování materiálu. Výpočet napjatosti v pružné oblasti se řídí Hookovým zákonem, v pružně-plastické oblasti je využíván princip Neuberovy koncepce.

Maximální hodnoty napětí se dle vyhodnocení vyskytují v místech uchycení potrubí s technologickou jednotkou. V těchto místech však dochází k ovlivnění od okrajových podmínek, z čehož vyplývá, že nelze použít membránového stavu napjatosti. Pevnostně se proto tyto úseky nevyhodnocují. Zkoumají se pouze silové a momentové účinky působící na dané místa uchycení, viz kapitola 6.10.

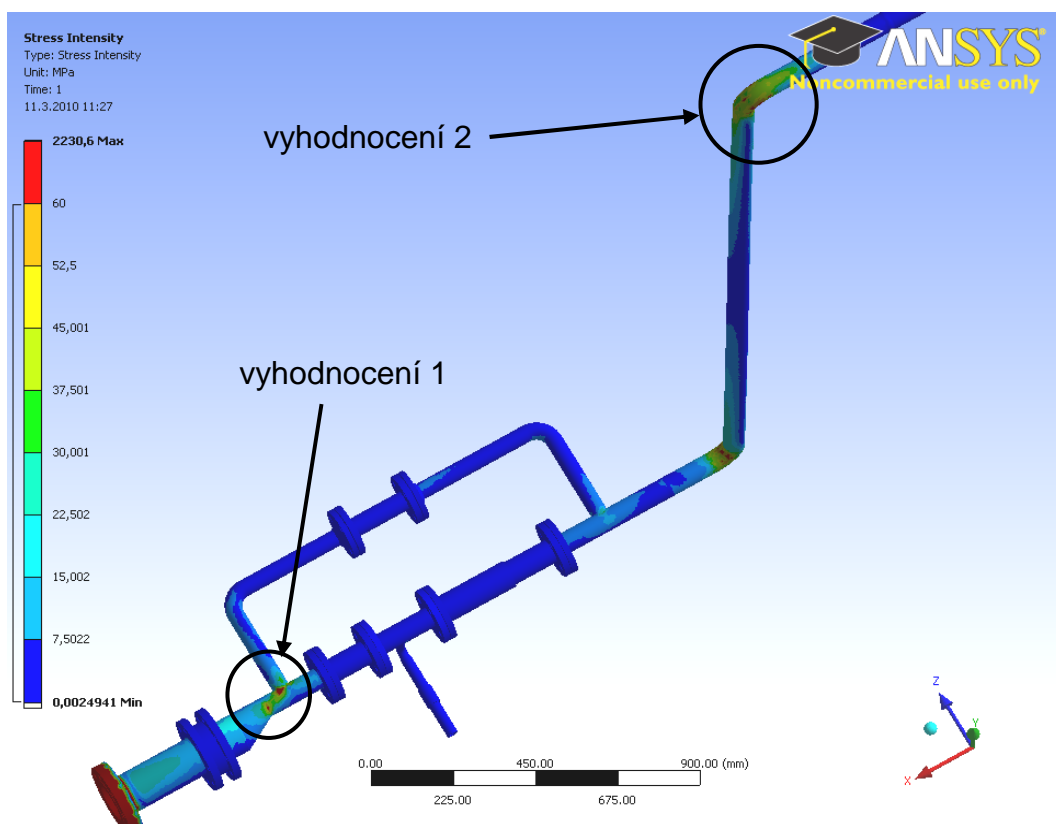
Z průběhu napětí zatížených potrubí je patrné, že v určitých oblastech se mohou vyskytovat lokální napětí. Nejkritičtější úseky, které jsou na obr. 6.14, 6.15, 6.16 a 6.17 zakroužkovány, jsou proto analyzovány v programu ANSYS. Zpravidla se vyhodnocují místa napojení potrubí a nejzatíženější koleno.



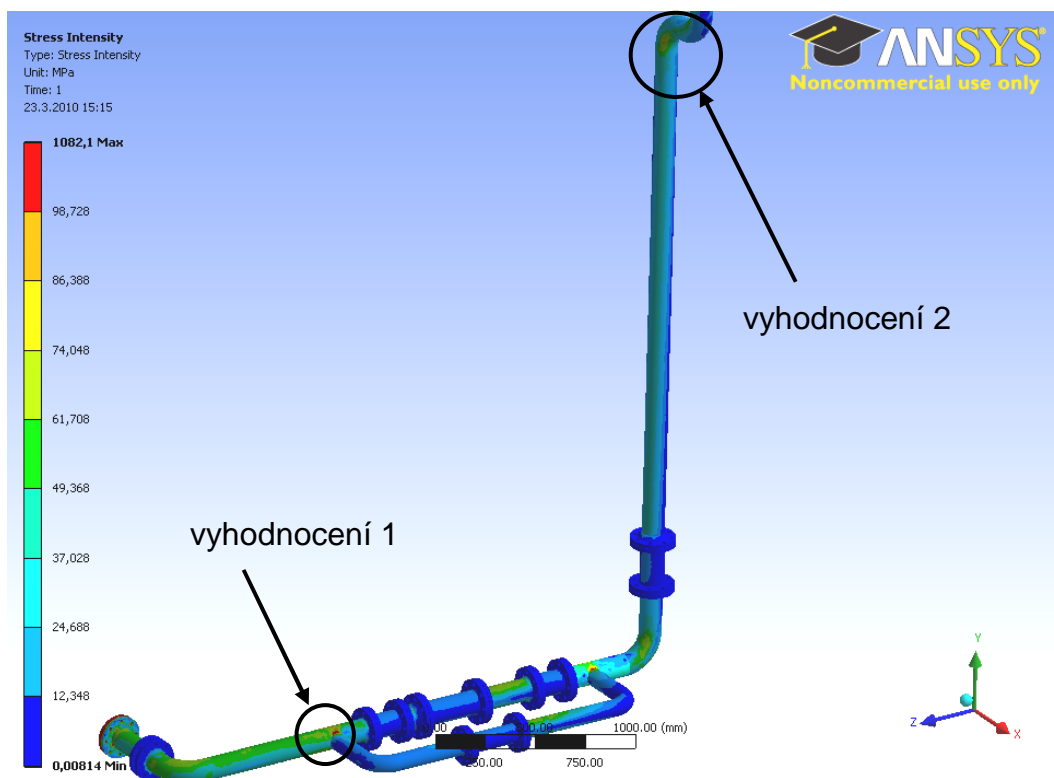
Obr. 6.14: Průběh napětí v potrubí spojující tepelný výměník s kolonou



Obr. 6.15: Průběh napětí v potrubí spojující kolonu s tepelným výměníkem



Obr. 6.16: Průběh napětí ve spodní části potrubí odvádějící kondenzát



Obr. 6.17: Průběh napětí ve spodní části parního potrubí

6.8 Kategorizace napětí

Kategorizace napětí se provádí u tlakových nádob. Zařazení napětí do jednotlivých kategorií umožňuje respektovat rozdíl mezi zatížením silového a deformačního původu a použít tak elastický výpočet napětí ve vrubu, aniž by byla konstrukce předimenzovaná. Jednotlivé kategorie vždy obsahují určité napětí, které se dle významnosti podílí na poškozování materiálu. Každá kategorie představuje redukované napětí, které je určeno ze součtu šesti složek tenzoru napětí. Z kategorií napětí se určí jednotlivé skupiny kategorií, které se liší rozdílnou hodnotou dovoleného napětí. Skupina kategorie napětí představuje redukované napětí, vypočtené ze součtu složek tenzoru napětí příslušných kategorií. K výpočtu redukovaného napětí se nejčastěji využívá teorie maximálního smykového napětí nebo HMH [13].

Byly zavedeny následující kategorie napětí: [13]

σ_m – prosté membránové napětí od silového zatížení

σ_b – prosté ohybové napětí od silového zatížení

σ_{mL} – místní membránové napětí od silového zatížení

σ_{bL} – místní ohybové napětí od zatížení silového a deformačního zatížení

σ_T – základní teplotní napětí

σ_k – kompenzační (membránová, ohybová, kroutící) napětí v potrubí

σ_{TL} – lokální teplotní napětí

Pro normální provozní podmínky platí rovnice: [13]

$$1) (\sigma)_1 = \sigma_m \leq [\sigma]$$

$$2) (\sigma)_2 = (\sigma_m \text{ nebo } \sigma_{mL}) + \sigma_b \leq 1,5 \cdot [\sigma]$$

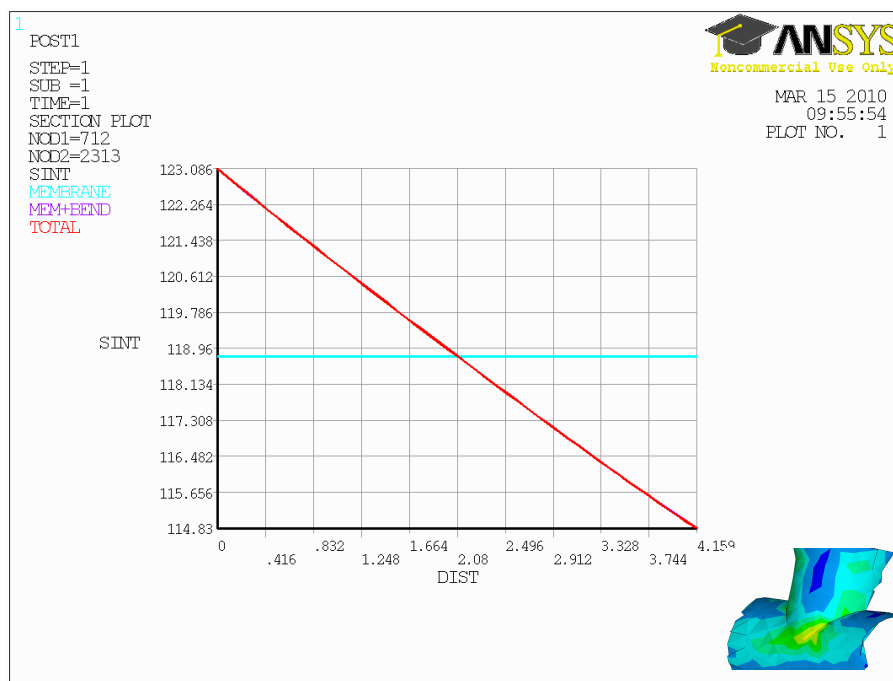
$$3) (\sigma)_R = (\sigma_m \text{ nebo } \sigma_{mL}) + \sigma_b + \sigma_k + \sigma_{bL} + \sigma_T \leq 3 \cdot [\sigma]$$

Pro staticky zatížené konstrukce platí první dvě rovnice. Třetí rovnice, která představuje rozkmit napětí se uvažuje v případech únavového (cyklického) zatížení. Z tohoto důvodu se budou pro kategorizaci napětí daných potrubních oblastí uvažovat pouze rovnice 1 a 2.

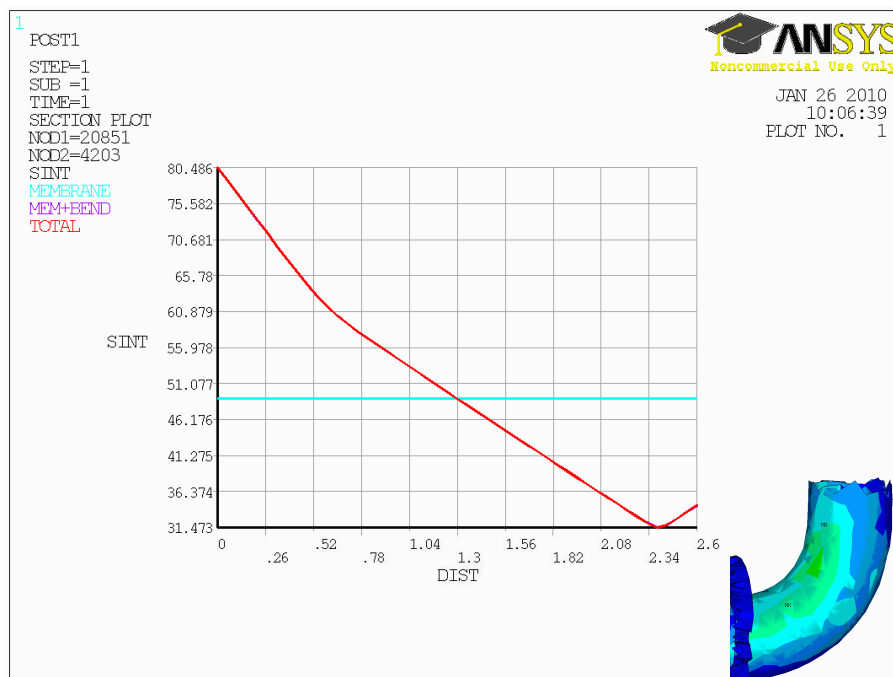
Z napěťových analýz bylo zjištěno rozložení napětí v potrubních sítích. Barevné označení specifikují místa výskytu lokálních napětí. Tyto místa zpravidla nebývají příliš rozsáhlá, ale dochází v nich k výskytu lokálních extrémů, které mohou svými hodnotami překračovat pružnou oblast a způsobovat porušení materiálu [3]. U nejzatíženějších oblastí jsou proto zjištěny průběhy membránového a celkového napětí po tloušťce válcové stěny, které jsou následně porovnány s dovolenými hodnotami napětí podle rovnic 1 a 2.

6.8.1 Vratné potrubí spojující tepelný výměník a kolonu

U této potrubní větve se kritické místo nacházelo v úseku zeslabeného T-kusu. Pro kontrolu byl dále vybrán oblouk ve spodní části potrubí, který rovněž vykazoval zvýšenou hodnotu napětí. Průběhy membránového a celkového napětí daných oblastí jsou znázorněny v grafech 6.1 a 6.2.



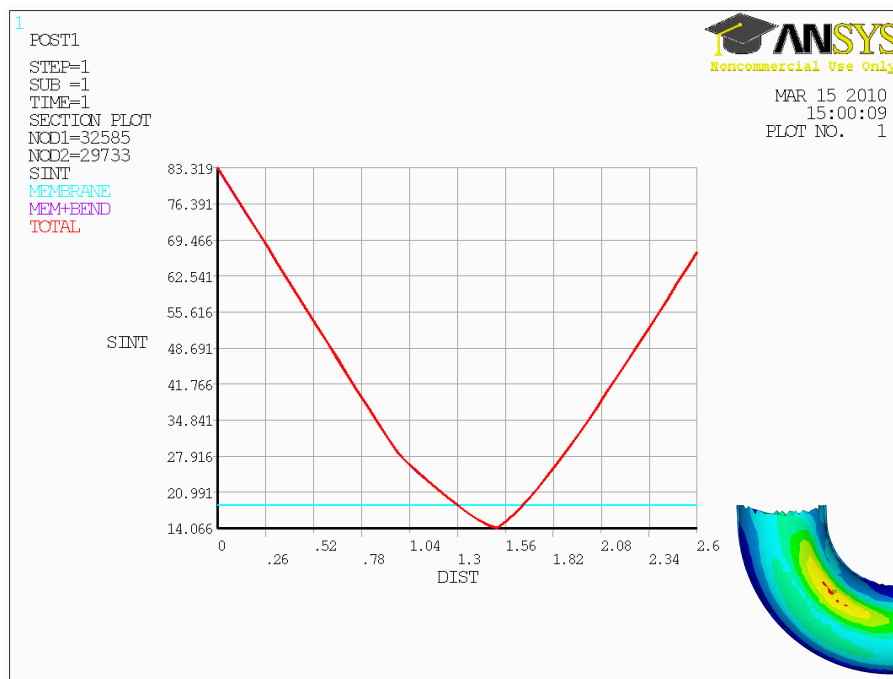
Graf 6.1: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 1



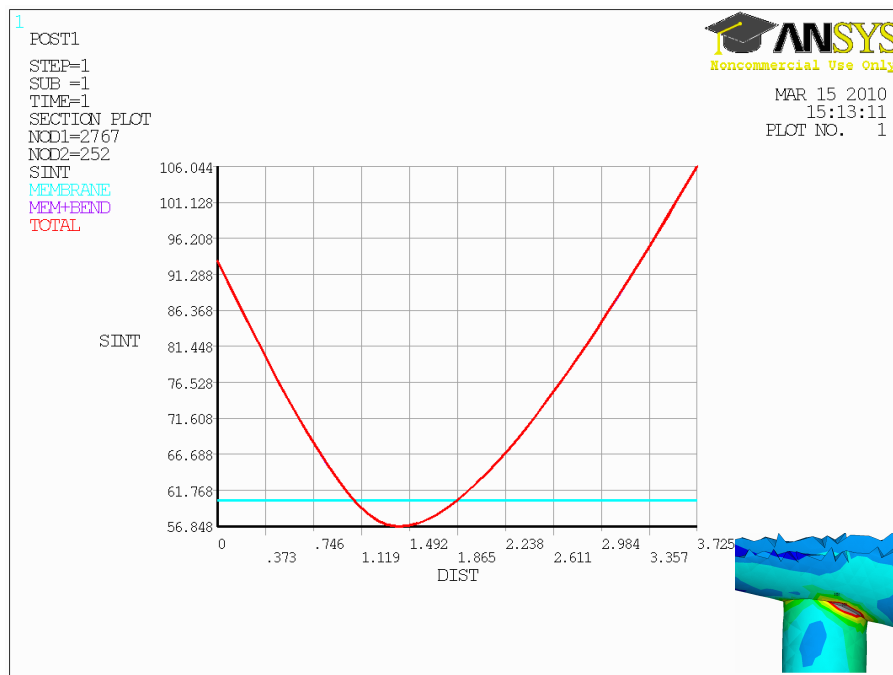
Graf 6.2: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 2

6.8.2 Vratné potrubí spojující kolonu s tepelným výměníkem

V potrubí odvádějící zbytkovou směs metanolu z destilační kolony do tepelného výměníku byly zkoumány dvě oblasti. Jedná se o obloukovou část u paty kolony, v které se vyskytuje největší deformace a T-kus v místě návaru potrubí DN 40 na centrální větev, kde se vyskytla zvýšená oblast napětí. Průběhy membránového a celkového napětí po tloušťce stěny jsou v grafech 6.3 a 6.4.



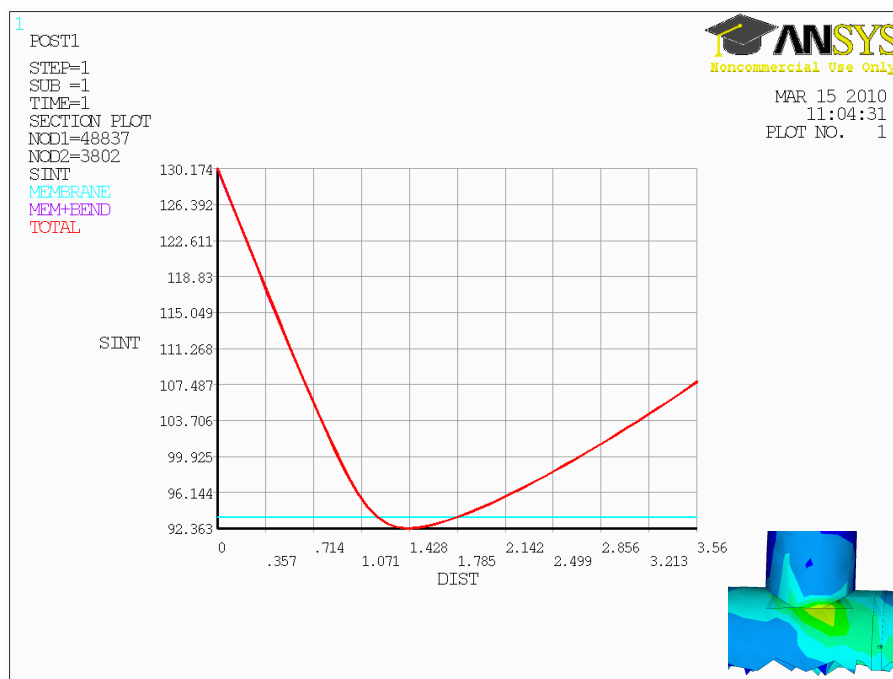
Graf 6.3: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 1



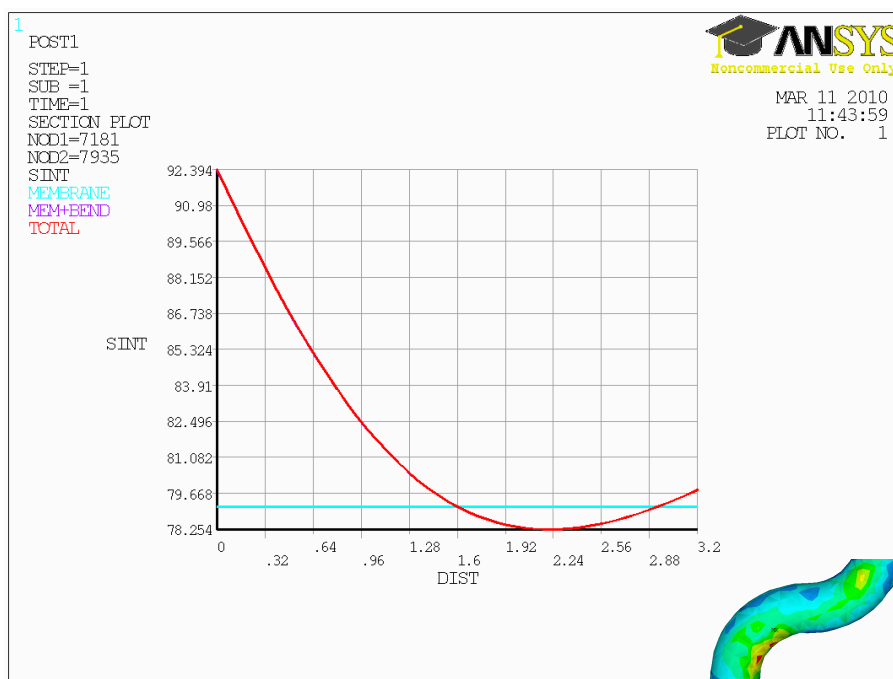
Graf 6.4: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 2

6.8.3 Potrubí přivádějící páru do výměníku

Potrubím proudí přehřátá pára se zvýšenými parametry teploty a tlaku. Pro vyhodnocení byly vybrány oblasti napojení paralelní větve ve spodní části potrubí a dva oblouky v dlouhém svislém úseku, v kterých se nachází maximální deformace. Vyhodnocení membránového a celkového napětí daných míst jsou znázorněny v grafech 6.5 a 6.6.



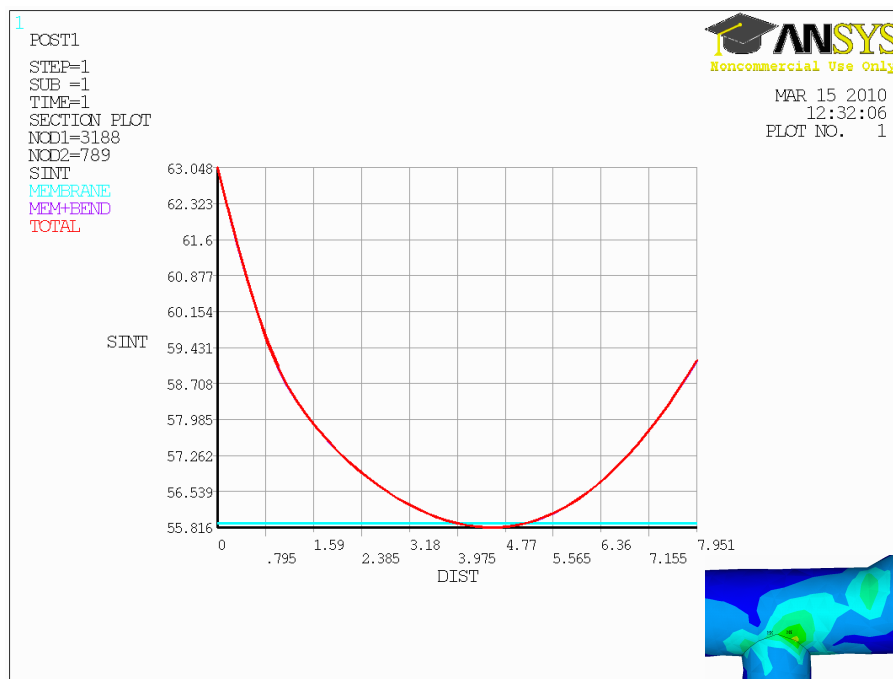
Graf 6.5: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 1



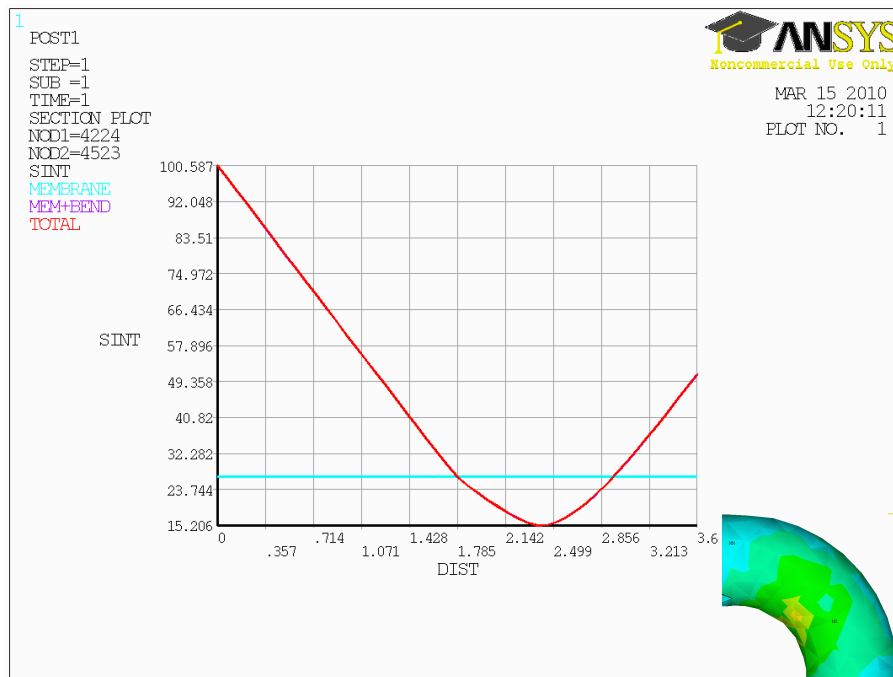
Graf 6.6: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 2

6.8.4 Potrubí odvádějící kondenzát z výměníku

V potrubí odvádějící kondenzát z výměníku byl vybrán T-kus ve spodní části potrubí, který vykazoval zvýšenou hodnotu napětí a oblouk v horní části, jenž je nejdeformovanější oblast celého potrubí. Průběhy membránového a celkového napětí daných míst nalezneme v grafech 6.7 a 6.8.



Graf 6.7: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 1



Graf 6.8: Průběh membránového a celkové napětí po tloušťce stěny v místě 2

6.9 Vyhodnocení napětí v potrubí dle normy EN 13480

Norma ČSN EN 13480 je technická norma pro kovová průmyslová potrubí. Jedná se o soubor norem, který komplexně stanovuje zásady navrhování, výroby, montáže, materiálů, kontroly a zkoušení potrubních systémů. Pro pevnostní výpočet byla využita část 3: konstrukce a výpočet. Z této normy byla použita podkapitola 5., která předepisuje vztahy pro dovolené hodnoty napětí austenitických, neaustenitických i jiných materiálů [2]. S dovolenými hodnotami napětí jsou srovnány napětí vyhodnocených úseků zjištěné z napěťových analýz.

6.9.1 Dovolená napětí potrubí dle normy EN 13480

Hodnoty dovoleného napětí pro provozní podmínky se určují podle příslušné normy z materiálových vlastností oceli [2].

Všechny potrubní trasy byly z austenitického materiálu s tažností $A > 35 \%$. Z důvodu známé hodnoty R_{mt} platí pro tyto oceli analytický vztah pro určení dovoleného napětí: $f = \min(R_{mt} / 3 ; R_{p1,0t} / 1,2)$, kde R_{mt} a $R_{p1,0t}$ jsou hodnoty meze pevnosti a meze kluzu za dané teploty. Tyto hodnoty byly vypočteny pomocí aproximace dané funkční závislosti materiálových charakteristik na teplotě. Jednotlivé hodnoty dovoleného napětí daných potrubních úseků při provozních podmínkách jsou vypočteny v tab. 6.4 [2].

| potrubí spojující tepelný výměník s kolonou | | | | |
|--|-------|-------------|--------|-----|
| provozní teplota : | 107°C | R_{mt} | 427,35 | MPa |
| | | $R_{p1,0t}$ | 197,04 | MPa |
| <i>dovolené napětí $f = 142,45 \text{ MPa}$</i> | | | | |
| potrubí spojující kolonu s výměníkem | | | | |
| provozní teplota : | 107°C | R_{mt} | 427,35 | MPa |
| | | $R_{p1,0t}$ | 197,04 | MPa |
| <i>dovolené napětí $f = 142,45 \text{ MPa}$</i> | | | | |
| potrubí přivádějící páru do výměníku | | | | |
| provozní teplota : | 143°C | R_{mt} | 413,05 | MPa |
| | | $R_{p1,0t}$ | 182,53 | MPa |
| <i>dovolené napětí $f = 137,68 \text{ MPa}$</i> | | | | |
| potrubí odvádějící kondenzát z výměníku | | | | |
| provozní teplota : | 100°C | R_{mt} | 430,00 | MPa |
| | | $R_{p1,0t}$ | 200,00 | MPa |
| <i>dovolené napětí $f = 143,33 \text{ MPa}$</i> | | | | |

Tab. 6.4: Hodnoty dovoleného napětí materiálu dle normy ČSN EN 13480

6.9.2 Porovnání dovolených a vypočtených hodnot napětí

Zjištěné průběhy napětí potrubních úseků jsou porovnány s dovolenými hodnotami stanovené normou ČSN EN 13480. Maximální hodnota celkového napětí se porovnává s 1,5 násobkem dovolené hodnoty. Membránové napětí se posuzuje vůči dovolené hodnotě napětí. Porovnání hodnot je znázorněno v tab. 6.5.

| potrubí spojující tepelný výměník s kolonou | | | |
|--|------------------------|-----------------------|-------------|
| <i>vyhodnocené místo 1</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 118,96 | 142,45 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 123,08 | 213,68 | VYHOVUJE |
| <i>vyhodnocené místo 2</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 50,00 | 142,45 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 80,49 | 213,68 | VYHOVUJE |
| potrubí spojující kolonu s tepelným výměníkem | | | |
| <i>vyhodnocené místo 1</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 18,00 | 142,45 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 83,32 | 213,68 | VYHOVUJE |
| <i>vyhodnocené místo 2</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 60,00 | 142,45 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 106,04 | 213,68 | VYHOVUJE |
| potrubí odvádějící kondenzát z výměníku | | | |
| <i>vyhodnocené místo 1</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 56,00 | 143,33 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 63,05 | 215,00 | VYHOVUJE |
| <i>vyhodnocené místo 2</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 27,00 | 143,33 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 100,59 | 215,00 | VYHOVUJE |
| potrubí přivádějící páru do výměníku | | | |
| <i>vyhodnocené místo 1</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 94,00 | 137,68 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 130,17 | 206,52 | VYHOVUJE |
| <i>vyhodnocené místo 2</i> | | | |
| <i>typ napětí</i> | <i>VYPOČTENÁ [MPa]</i> | <i>DOVOLENÁ [MPa]</i> | <i>STAV</i> |
| membránové napětí | 79,00 | 137,68 | VYHOVUJE |
| celkové napětí | 92,39 | 206,52 | VYHOVUJE |

Tab. 6.5: Porovnání hodnot napětí v provozním režimu

6.10 Silové a momentové účinky na místa spojení potrubí a technologické jednotky

Z obrázků znázorňující průběhy napětí je patrné, že největších napěťových hodnot se dosahuje v místech spojení potrubí s technologickou jednotkou. Tyto úseky často bývají nejkritičtější body celé sestavy, protože musí přenášet všechny předpokládané typy zatížení od zdeformovaného potrubí i technologického zařízení. K pevnostní analýze v potrubní technice proto patří kontrola sil a momentů v místě spojení potrubí s technologickým aparátem.

Při překročení mezních hodnot nastane destrukce kotvení. Může dojít ke ztrátě těsnosti spoje nebo jinému poškození. V nejhorším případě by nastalo vytržení potrubní sítě z pláště aparátu, což by znamenalo velkou škodu na zařízení, případně i lidské zranění. Již při návrhu zařízení se proto stanovují dovolené velikosti sil a momentů na místa spojení, které se za provozních podmínek kontrolují.

6.10.1 Porovnání a vyhodnocení účinků na místa spojení

Pomocí jednoduchých funkcí v programu ANSYS Workbench byly zjištěny silové a momentové účinky na místa uchycení potrubí k technologické jednotce v provozním režimu. Provozní hodnoty zatížení hrdel by se vždy měly nacházet pod dovolenými hodnotami, které jsou stanoveny výrobcem zařízení. Ty udávají maximální možné silové a momentové zatížení hrdla ve směrech x, y, z. Dovolené hodnoty pro hrdla výměníku jsou zadány, hodnoty pro hrdla kolony jsou určeny z materiálů firmy KRÁLOVOPOLSKÁ SAG, s.r.o, které nemohou být zveřejněny v práci. Hlavní parametr pro určení těchto hodnot je průměr hrdla destilační kolony. Porovnání a vyhodnocení daných účinků na hrdla zařízení je provedeno v tab. 6.6.

| potrubí spojující tepelný výměník s kolonou | | | | | | |
|---|-----------|---------------|------------------|---------------|-------------|--------|
| SPOJ POTRUBÍ S TEPELNÝM VÝMĚNÍKEM - DELŠÍ ÚSEK | | | | | | |
| VYPOČÍTANÉ HODNOTY | | | DOVOLENÉ HODNOTY | | VYHODNOCENÍ | |
| | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA | MOMENT |
| x | 2,3 | 0,20 | 6,00 | 1,80 | VYHOVUJE | |
| y | 0,16 | 0,06 | 4,50 | 1,20 | VYHOVUJE | |
| z | 0,05 | -0,73 | 6,00 | 1,56 | VYHOVUJE | |
| SPOJ POTRUBÍ S TEPELNÝM VÝMĚNÍKEM - KRATŠÍ ÚSEK | | | | | | |
| VYPOČÍTANÉ HODNOTY | | | DOVOLENÉ HODNOTY | | VYHODNOCENÍ | |
| | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA | MOMENT |
| x | -1,35 | 0,79 | 6,00 | 1,80 | VYHOVUJE | |
| y | 3,04 | 0,91 | 4,50 | 1,20 | VYHOVUJE | |
| z | 2,26 | -0,78 | 6,00 | 1,56 | VYHOVUJE | |

| SPOJ POTRUBÍ S KOLONOU | | | | | | |
|---|-----------|---------------|------------------|---------------|-------------|--------|
| VYPOČÍTANÉ HODNOTY | | | DOVOLENÉ HODNOTY | | VYHODNOCENÍ | |
| | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA | MOMENT |
| x | 0,403 | 1,73 | 12,00 | 9,00 | VYHOVUJE | |
| y | 1,26 | 1,07 | 9,00 | 6,00 | VYHOVUJE | |
| z | -2,31 | -0,93 | 12,00 | 7,80 | VYHOVUJE | |
| potrubí spojující kolonu s tepelným výměníkem | | | | | | |
| SPOJ POTRUBÍ S TEPELNÝM VÝMĚNÍKEM | | | | | | |
| VYPOČÍTANÉ HODNOTY | | | DOVOLENÉ HODNOTY | | VYHODNOCENÍ | |
| | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA | MOMENT |
| x | -0,46 | 0,23 | 6,00 | 1,80 | VYHOVUJE | |
| y | 0,43 | -0,08 | 4,50 | 1,20 | VYHOVUJE | |
| z | -0,59 | 0,07 | 6,00 | 1,56 | VYHOVUJE | |
| SPOJ POTRUBÍ S KOLONOU | | | | | | |
| VYPOČÍTANÉ HODNOTY | | | DOVOLENÉ HODNOTY | | VYHODNOCENÍ | |
| | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA | MOMENT |
| x | 0,28 | 0,44 | 4,80 | 1,44 | VYHOVUJE | |
| y | 0,36 | -0,31 | 3,60 | 0,96 | VYHOVUJE | |
| z | -0,70 | 0,10 | 4,80 | 1,25 | VYHOVUJE | |
| potrubí přivádějící páru do tepelného výměníku | | | | | | |
| SPOJ POTRUBÍ S TEPELNÝM VÝMĚNÍKEM | | | | | | |
| VYPOČÍTANÉ HODNOTY | | | DOVOLENÉ HODNOTY | | VYHODNOCENÍ | |
| | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA | MOMENT |
| x | 0,02 | 1,28 | 6,00 | 1,80 | VYHOVUJE | |
| y | 0,22 | -0,21 | 4,50 | 1,20 | VYHOVUJE | |
| z | -0,16 | -0,99 | 6,00 | 1,56 | VYHOVUJE | |
| potrubí odvádějící kondenzát z tepelného výměníku | | | | | | |
| SPOJ POTRUBÍ S TEPELNÝM VÝMĚNÍKEM | | | | | | |
| VYPOČÍTANÉ HODNOTY | | | DOVOLENÉ HODNOTY | | VYHODNOCENÍ | |
| | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA [kN] | MOMENT [kN·m] | SILA | MOMENT |
| x | -0,73 | -0,13 | 6,00 | 1,80 | VYHOVUJE | |
| y | 1,36 | 0,05 | 4,50 | 1,20 | VYHOVUJE | |
| z | 0,13 | -0,82 | 6,00 | 1,56 | VYHOVUJE | |

Tab. 6.6: Porovnání silových a momentových účinků v místě hrdel spojení

Z vyhodnocení zatížení potrubních spojů je patrné, že všechny hodnoty silových a momentových účinků jsou menší než dovozené hodnoty udávající maximální přípustné zatížení. Z toho vyplývá, že dané místa nebudou poškozeny účinky statického zatížení. Další detailnější analýza těchto míst už není nutná.

6.11 Zkoušení potrubí

Každé tlakové zařízení musí být před uvedením do provozu podrobeno tlakové zkoušce. Zkoušku, pokud není stanoveno jinak, provádí výrobce. V potrubní technice rozlišujeme zkoušky celého smontovaného potrubí nebo jednotlivých částí (armatury, ohyby, tvarovky). Zkoušky se řídí platnými předpisy a normami [6].

Zkoušky potrubních sítí záleží na mnoha faktorech, jako jsou provozní podmínky, klimatické podmínky, pracovní látka, prostředí a další. Důležitost jednotlivých faktorů je často různá. O tom, která kritéria jsou nepostradatelná a která se dají částečně zanedbat musí rozhodnout projektant zařízení. Z těchto rozhodnutí následně vzejdou konečné zkušební podmínky.

Požadavky na zkoušení jednotlivých částí potrubí nejsou vždy shodné. Z tohoto důvodu nelze uvažovat jednotné předpisy pro všechny typy výrobků. Potrubní části by se měly zkoušet pokud možno látkami, pro které jsou určeny. Obvyklým médiem je voda, vodní pára nebo vzduch. Vyhodnocuje se například správná funkce armatur, jejich těsnost nebo zadíráání [6].

Zkouška smontovaného potrubí se provádí až po ukončení montáže, avšak před konečnou úpravou povrchu, tepelnou izolací apod. Zpravidla se tyto celky zkoušejí zkušebním přetlakem určitého média (voda, pára) při příslušné pracovní teplotě. Předepsané a používané zkušební přetlaky, teploty a pracovní média se přizpůsobují druhu a účelu zkoušky a jsou uváděny v technické potrubní dokumentaci nebo v technických dodacích předpisech. Zkouší se správná činnost celku, pevnost nebo těsnost [6].

V této diplomové práci byly vyhodnoceny zkušebními požadavky již smontované potrubní sítě. Podmínky zkoušky byly tlakové, přičemž se jako médium použila voda. Hodnocení proběhlo pomocí napětově-deformační analýzy.

6.11.1 Zkušební podmínky potrubí

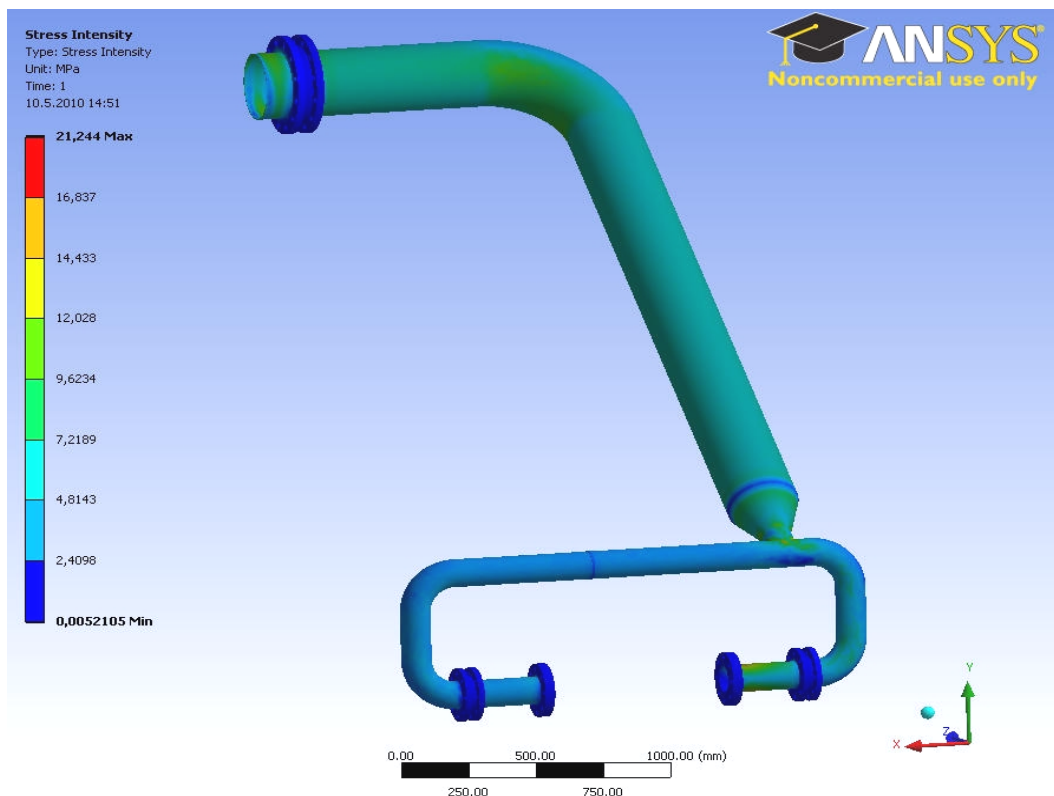
Zatížení zkušebními podmínkami představuje hodnoty zkušebního tlaku, výsledné hmotnosti celku (potrubí, médium) a materiálové vlastnosti potrubí, které jsou vyčteny z technického listu oceli. Hodnoty zkušebních tlaků a výsledné tíhy sestavy jsou znázorněny v tab. 6.7. Do výsledné tíhy potrubí se započítává hmotnost samotného potrubí a hmotnost od zkušebního média, tedy vody. Izolace v tomto stavu nebyla uvažována. Postup výpočtů je shodný s výpočtem znázorněným v kapitole 6.5.1 a proto zde nebude rozveden. Systém uložení všech typů potrubí byl nastaven tak, že se v místech uchycení potrubí s technologickou jednotkou předpokládaly nulové posuvy hrdel. Pružinové závěsy byly ponechány.

| typ potrubí | $P_{\text{zkušební}} [\text{MPa}]$ | $\zeta_{\text{celk}} [\text{kg/m}^3]$ |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| spojující výměník s kolonou | 0,219 | 17483 |
| spojující kolonu s výměníkem | 0,219 | 12772 |
| přívádějící páru do výměníku | 0,24 | 11593 |
| odvádějící kondenzát z výměníku | 0,24 | 10920 |

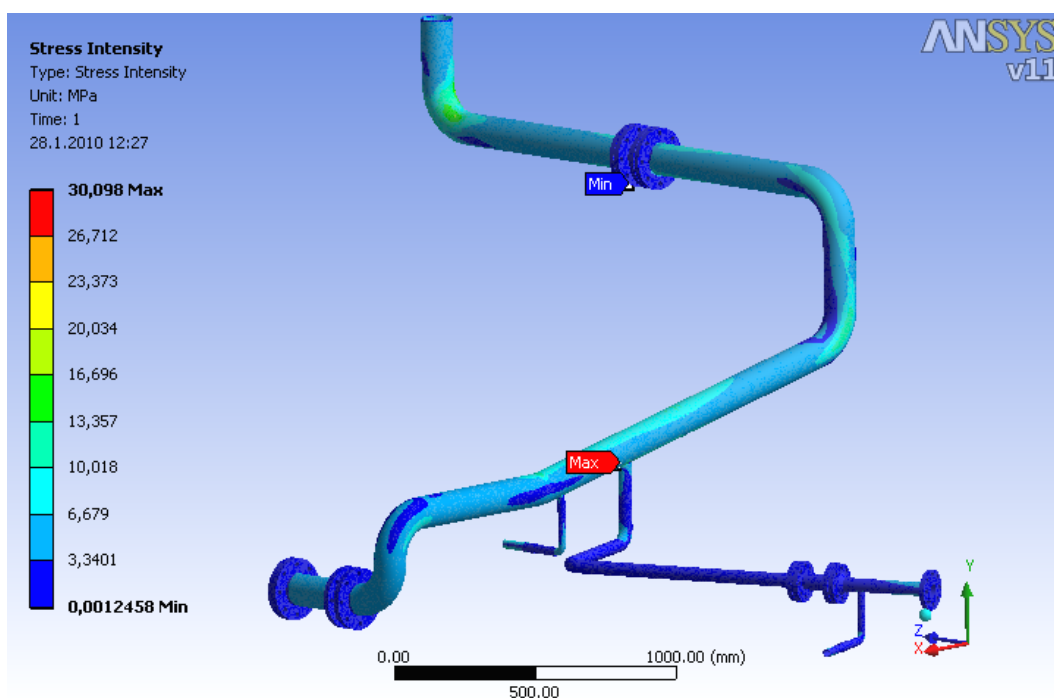
Tab. 6.7: Uvažované hodnoty zatížení potrubí při zkoušce

6.11.2 Napjatost potrubí při zkoušení

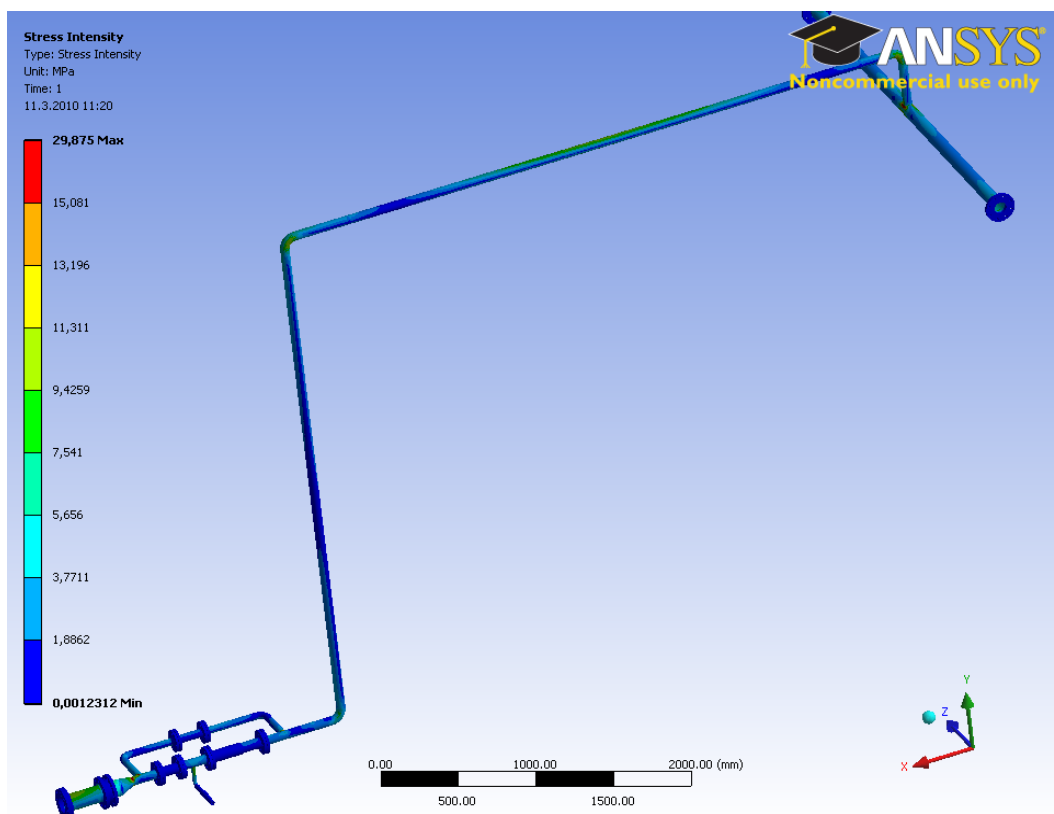
Průběhy napětí v jednotlivých potrubních větvích při zkušebním zatížení jsou znázorněny pomocí barevného schéma na obrázcích 6.18, 6.19, 6.20 a 6.21. Z napěťových hodnot je patrné, že zadané zkušební podmínky jsou zanedbatelné.



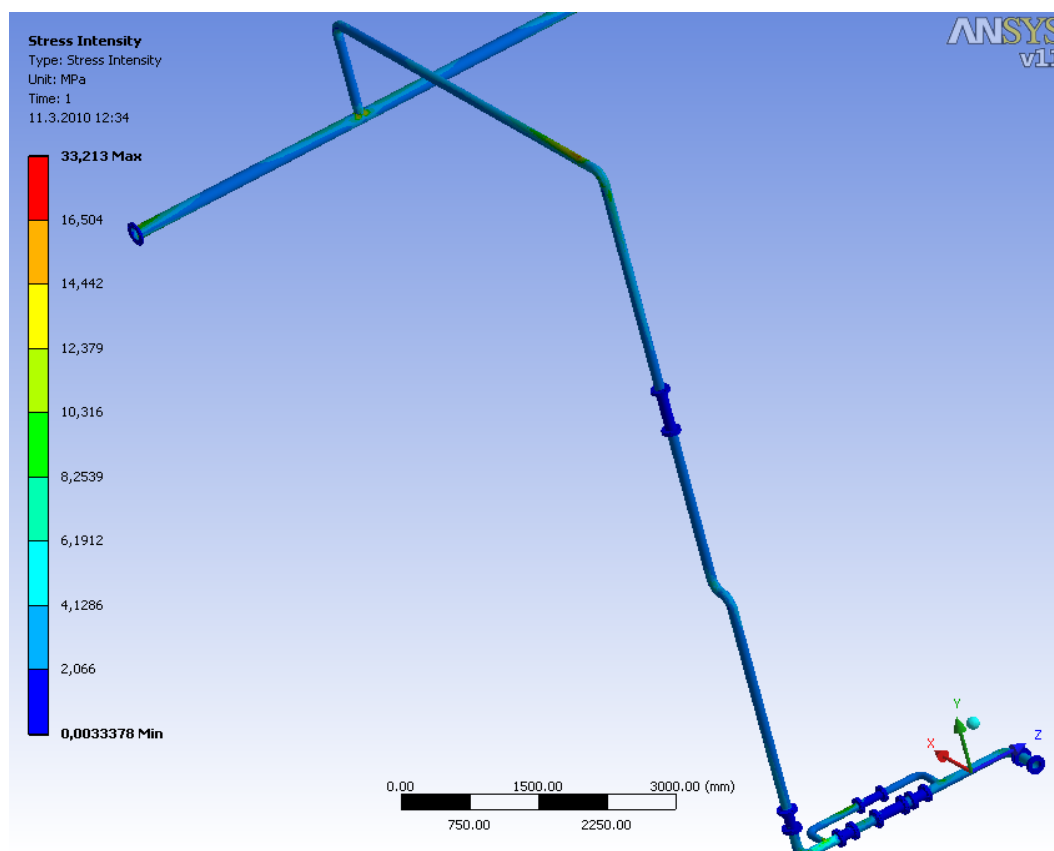
Obr. 6.18: Průběh napětí v potrubí spojující tepelný výměník s kolonou



Obr. 6.19: Průběh napětí v potrubí spojující kolonu s tepelným výměníkem



Obr. 6.20: Průběh napětí v kondenzačním potrubí



Obr. 6.21: Průběh napětí v parním potrubí

6.11.3 Vyhodnocení napjatosti potrubí při zkoušení

Z výsledků rozložení napjatosti při zkušebním zatížení vyplývá, že hodnoty napětí jsou dosti malé. Norma ČSN EN 13480 stanovuje dovolené hodnoty napětí, které by neměly překročit větší z hodnot $95 \% R_{p1,0}$; $45 \% R_m$ při specifikované zkušební teplotě [2], kde $R_{p1,0}$ a R_m jsou smluvní mez kluzu a mez pevnosti materiálu. Pro zkušební zatížení nebyl požadavek na zkušební teplotu, proto byly použity hodnoty $R_{p1,0}$ a R_m za normální teploty. Zkušební podmínky by tedy neměly vyvolat napětí přesahující řádově 270 MPa.

Při porovnání vypočtených a dovolených hodnot napětí je možné vidět, že dané zkušební zatížení v nejzatíženějších oblastech je vždy několikanásobně nižší než dovolená hodnota napětí stanovená normou ČSN EN 13480. Napjatost v nejzatíženějším úseku je pouze 33,213 MPa. Z tohoto důvodu není nutné provádět deformační analýzu, kategorizaci napětí nebo podrobnější analýzu průběhu napětí po tloušťce stěny. Všechna potrubí jsou dostatečně dimenzovaná.

Z výsledků napěťové analýzy je rovněž patrné, že zvýšené hodnoty zkušební tlaku nemají velký vliv na napjatost v tělesech. Je to způsobené především tloušťkou všech uvažovaných skořepin, které by po přepočtu na maximální tlak vydržely až několikanásobně vyšší hodnotu.

V případech kombinace tohoto přetlaku s určitou teplotou (např. s provozní) je však situace odlišná. Pro ověření této skutečnosti byla provedena pevnostní analýza potrubí s uvažovaným zatížením zkušební tlak - provozní teplota, jejíž výsledky ukázaly, že v určitých místech vznikají lokální extrémy, které svými hodnotami přesahují dovolenou oblast. Tento případ tedy názorně ukazuje, jaký vliv má teplota na pevnostní analýzu. Kombinace tohoto zatížení pro pevnostní analýzu již nebyla požadována, a proto v práci není zveřejněna.

7 ANALÝZA POTRUBÍ V PROGRAMU CAESAR II

7.1 Úvod k programu Caesar II

Program Caesar II je produkt americké společnosti COADE, Inc., sídlící v Texasu. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších profesionálních MKP softwarů určených pro pevnostní výpočty potrubních systémů. Vyhodnocuje strukturální reakce materiálů a napěťové analýzy podle mezinárodních předpisů a norem [20].

Modelování potrubních sítí v programu Caesar II se provádí následujícím způsobem: každý výpočtový model je v souladu s metodou konečných prvků rozdělen na prvky, nazývané výpočtové větve. Každá větev začíná a končí ve výpočtovém uzlu. Ve větvi se předpokládají konstantní materiálové charakteristiky, konstantní teplota, tlak a spojitě zatížení.

Caesar umožňuje pracovat s již kompletními technologickými sestavami. Pomocí jeho vstupní nabídky je možné namodelovat nejen přímé úseky potrubí a oblouky dle zadání, ale také jakoukoliv součást systému (přírubu, armaturu, hrdlo aparátu, podpěrnou ocelovou konstrukci, atd.) a jednoduše zadat jejich specifickou vlastnost (tuhost, hmotnost). Dokáže vymodelovat sestavu bez významných zjednodušení, což vytváří výpočtový model, který v nejlepší možné míře odpovídá skutečnosti. To významně přispívá především k časové úspoře výpočtu. V této pevnostní analýze tedy bude použitý kompletní potrubní model vařáku.

V programu Caesar II lze provádět statickou (lineární i nelineární) a dynamickou analýzu potrubních systémů, vyhodnocovat zatížení větrem, sněhem nebo například zeminou v případě hodnocení potrubí zasypaného v zemi. Součástí analýzy může být i návrhový výpočet potrubních dílů, hodnocení zatížení přírub, hrdel aparátů, čerpadel, uložení a mnoho dalších specifických aplikací, týkající se potrubní techniky [20].

7.2 Modelování potrubní sítě vařáku

Tvorba zátěžného modelu byla provedena podle výkresové dokumentace jednotlivých typů potrubí, které jsou vzájemně propojeny ve vařáku. Model vařáku je znázorněn pomocí tzv. „fiktivních větví“, které znázorňují potrubní cesty v zařízení a samotným vařákem, jenž se nachází ve středu uvažované oblasti. Pro usnadnění tvorby modelu byla využita funkce návrhu „elementu po elementu“, která dovoluje provádět změny a korekce modelu v libovolném stádiu rozpracování [20]. Tímto způsobem byla vytvořena kompletní potrubní sestava, jenž je znázorněna na obr. 7.1.

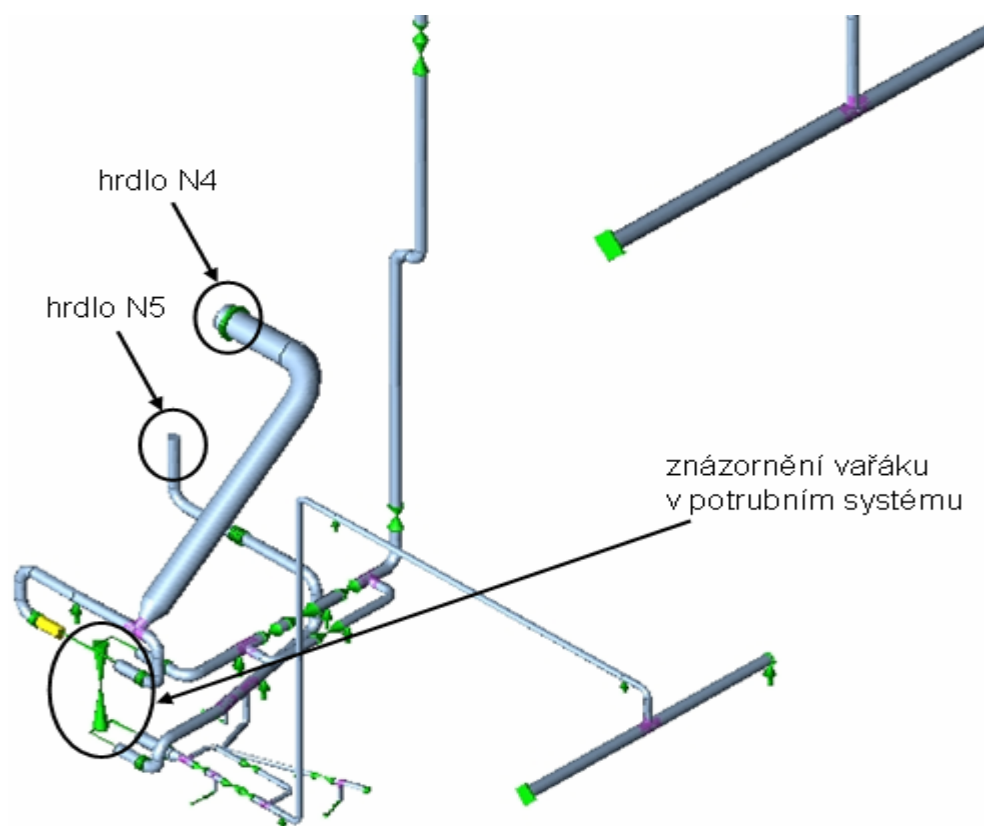
Veškeré potrubní parametry jsou k nalezení v příložených kusovnících a technických výkresech potrubí. Pro charakterizování vařáku byla zadána pouze hodnota provozní hmotnosti, která je udávána 800 kg.

7.3 Zatížení a okrajové podmínky potrubního systému

Program současně pracuje s hodnotami provozního i zkušebního zatížení. Oba stavy se zadávají přímo při modelování sestavy, což nejen, že urychluje pevnostní výpočet, ale i ulehčuje činnost při zadávání.

Program dále obsahuje širokou databázi používaných materiálů, konstrukčních prvků, norem a mnoho dalších užitečných aplikací, které usnadňují práci při zadávání konkrétní úlohy. Pomocí těchto aplikací byl zadán uvažovaný materiál 1.4404 i použitá norma ČSN EN 13480, podle které byla vyhodnocována výsledná napětí. Z tohoto důvodu odpadlo zadávání materiálových vlastností i výpočet dovolených hodnot.

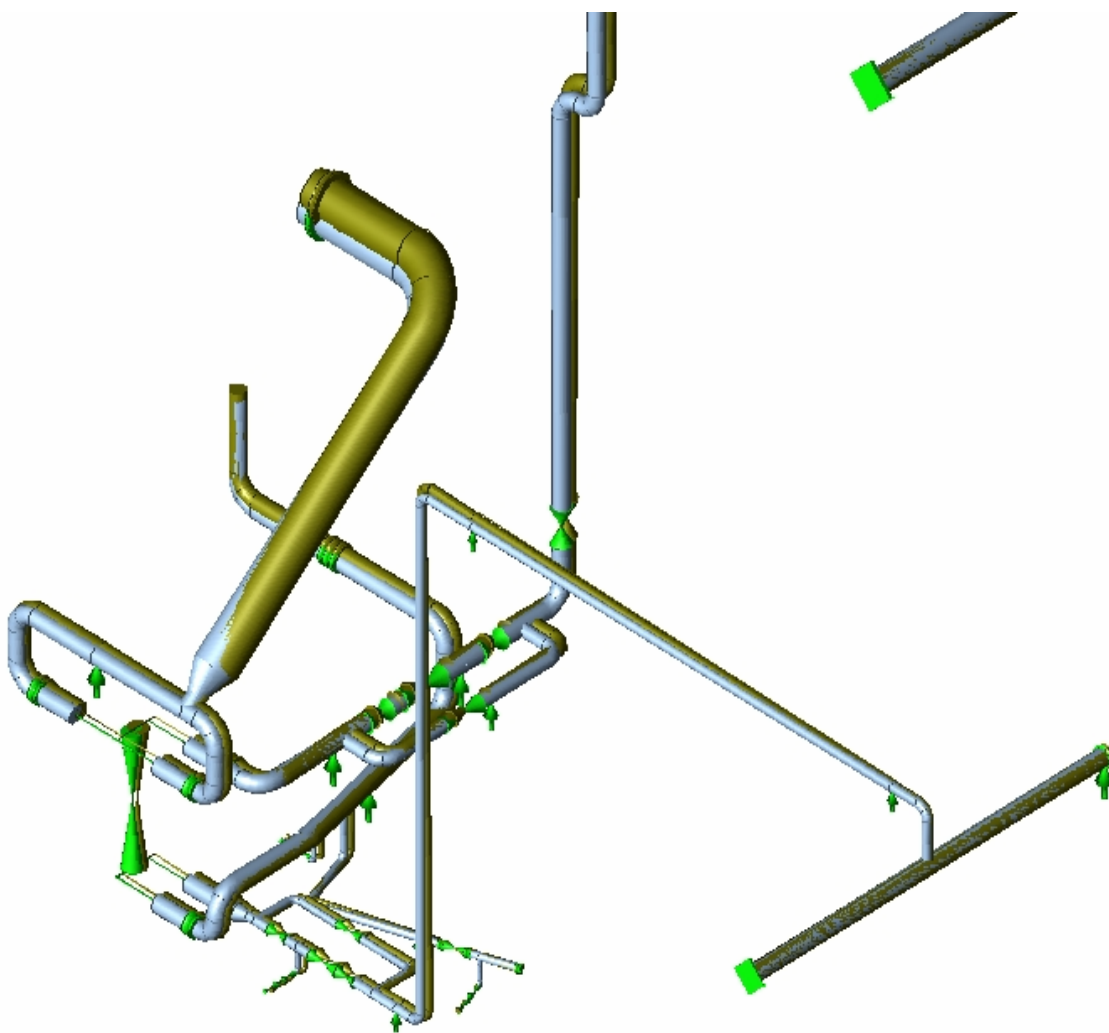
V důsledku vytvoření kompletního modelu pro pevnostní analýzu je definování vstupních parametrů nepatrně odlišné od celkového zatížení modelů v programu ANSYS. Při zadávání provozních i zkušebních parametrů jsou uvažovány hodnoty tlaků, teplot, vlastní tíhy potrubí včetně náplně a izolace, které jsou do programu zadávány na základě průměru, tloušťky stěny a specifických hmotností materiálu a dilatační posuvy hrdel připojené destilační kolony (hrdla N4 a N5). Kolona není modelována společně s potrubím, a proto je potřeba dilatační posuvy při provozních podmínkách nadefinovat. Tlaková zkouška probíhá za teploty okolí, resp. montážní teploty, a proto jsou v tomto režimu uvažovány nulové dilatační posuvy. Všechny vyjmenované faktory jsou převzaty z předchozí výpočetní analýzy a jsou k nalezení v tab. 6.1, tab. 6.2, tab. 6.3, tab. 6.7. Oproti minulému výpočtu se uvažuje izolace i ve zkušebních podmínkách.



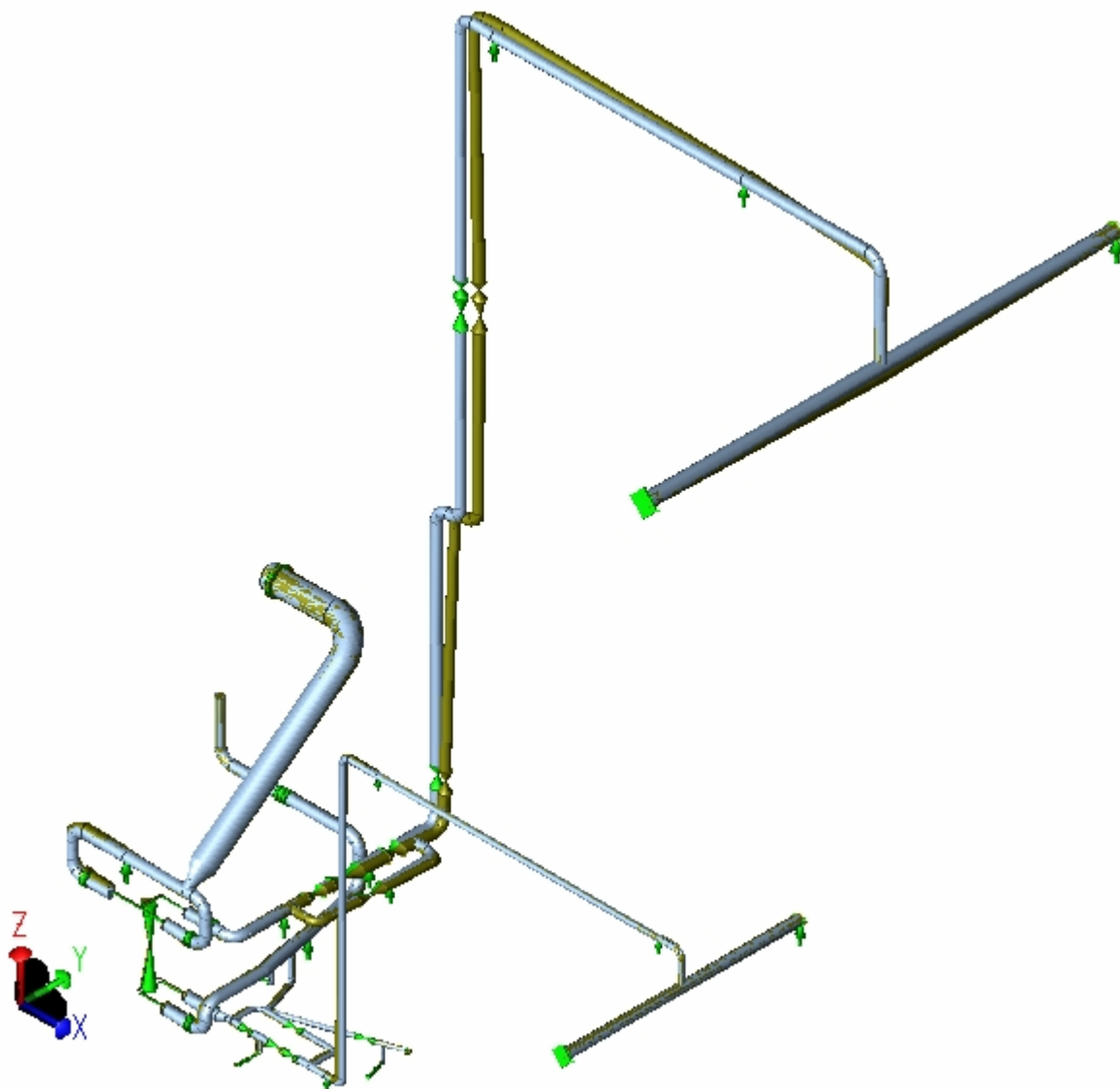
Obr. 7.1: Technologické schéma modelu vařáku v programu Caesar II

7.4 Deformace potrubní sítě v důsledku zatížení

Deformace celého technologického systému názorně ukazuje jak se navzájem ovlivňují jednotlivé potrubní části a jak je tepelný výměník veden v potrubí. Toto zobrazení umožňuje nejen získat představu o celkovém rozpoložení systému, ale i navrhnout patřičná opatření pro místa s nadměrnými deformačními hodnotami. Deformace modelu pro jednotlivé zatížení jsou vykreslené na obrázcích 7.2 a 7.3.



Obr. 7.2: Deformace potrubní sítě v důsledku provozního zatížení



Obr. 7.3: Deformace potrubní sítě v důsledku zkušebního zatížení

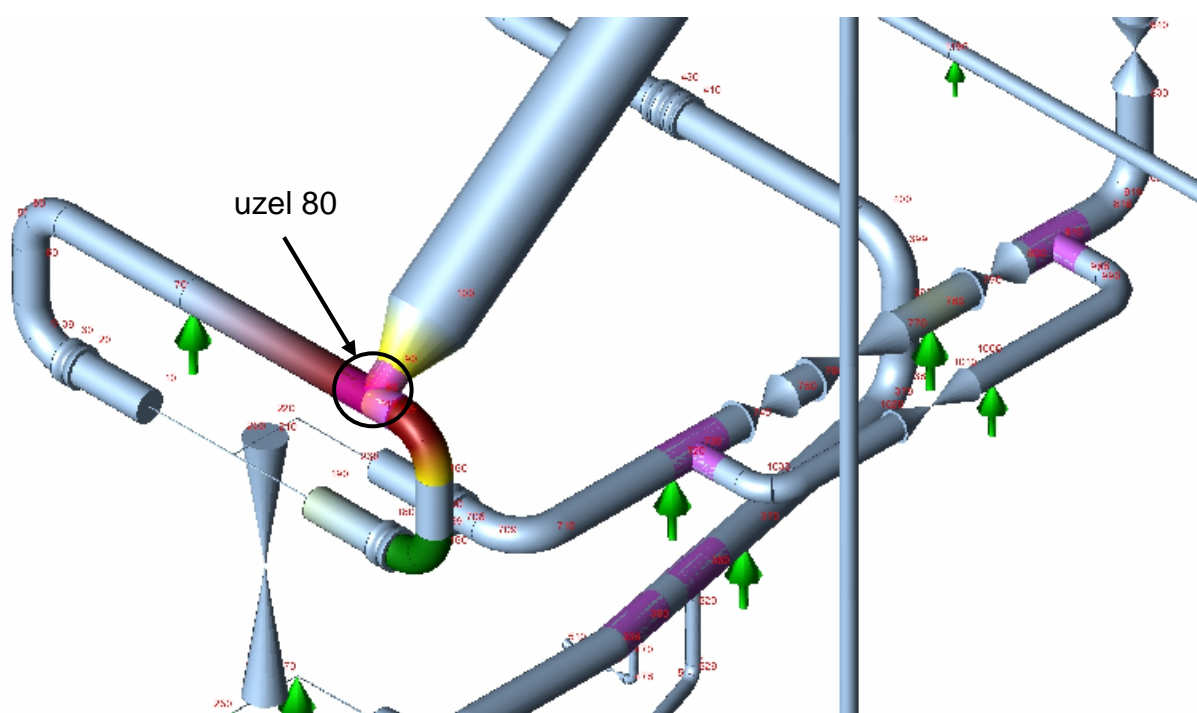
Při provozním zatížení lze pozorovat celkovou změnu polohy celého systému. Především z důvodů tepelné roztažnosti materiálů a vzájemného ovlivnění jednotlivých potrubních tras spojených ve vařáku došlo ke kompletní změně výchozí pozice. Ve sledovaném modelu však nebylo nalezeno žádné nadměrně deformované místo, což poukazuje na kvalitně navrženou technologickou síť. Přesto by tento stav mohl být podroben určitým úpravám.

Z vykreslení modelu při zkušebních podmínkách je vidět, že nedochází k příliš velké deformaci systému. Zvýšená deformace vlivem vnitřního tlaku se vyskytuje pouze v dlouhém svislém úseku parního potrubí. V centrální části však prakticky nedochází k vychýlení. Oproti deformaci modelu při zatížení provozními podmínkami je reakce systému na zkušební podmínky minimální.

7.5 Napjatost v provozních a zkušebních podmínkách

Program vykresluje napěťovou charakteristiku v závislosti na součiniteli využití napětí, to je poměr redukovaného napětí k dovolenému. Čím více se redukované napětí daného elementu blíží dovolené hodnotě, tím názorněji je barevné vykreslení modelu. V opačném případě takřka nedochází k barevné změně vykreslení.

Z vyhodnocení napětí (viz kapitola 7.6) je vidět, že v případě zkušebního zatížení je součinitel využití napětí zanedbatelný. V tomto případě program téměř nevykresluje danou napěťovou charakteristiku a proto tento průběh napětí nebyl ukázán. V případě provozních podmínek je téměř 90 % využití v uzlu 80. Na tuto hodnotu program reaguje názorným grafickým obrazem, jenž je znázorněn na obrázku 7.4.



Obr. 7.4: Průběh napětí v modelu vařáku při provozním zatížení

7.6 Vyhodnocení napětí kritických úseků

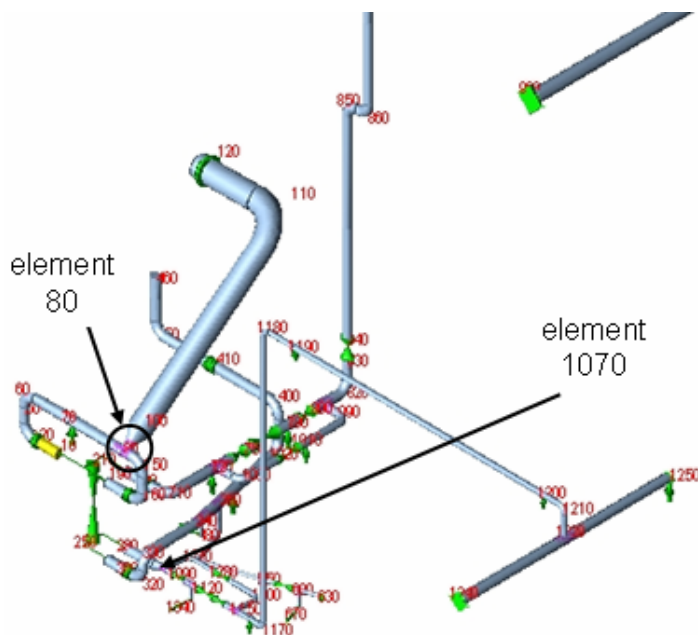
V programu byly vyhodnoceny napětí nejzatíženějších elementů na uvažované provozní a zkušební podmínky. Pro vyhodnocení napětí se využívá dvou způsobů: rozpisu všech uvažovaných napětí ve všech elementech nebo pouze vyhodnocení elementů s maximální napjatostí. Detailní výpis obsahuje kompletní parametry napjatosti každého prvku modelu. Druhá varianta zobrazí pouze uzly, v kterých jednotlivé typy napětí dosáhnou svých maximálních hodnot. Z důvodů velkého množství daných prvků (modely často obsahují i stovky elementů) se v praxi využívá pouze zkrácené zprávy vyhodnocení napětí (tzv. „stress summary“).

V práci je ukázáno obojího způsobu vyhodnocení. V tab. 7.1 jsou vždy nejprve obsaženy údaje vyhodnocené příkazem „stress summary“ uvažovaného zatížení a následně je ukázána část detailního výpisu napěťových hodnot nejzatíženějšího elementu a jeho okolí. Zobrazení elementů v modelu je znázorněno na obr. 7.5.

Caesar vyhodnocuje pouze jednoosou napjatost. Pro případ statického zatížení nabízí následující kategorie napětí:

- a) primární zatížení - SUS (studený stav), HYD (zkušební stav)
(přetlak + gravitace + trvalé mech. zatížení)
- b) cyklické zatížení – EXP (roztažnost)
(teplotní dilatace)
- c) celkové zatížení se zahrnutím špičkového napětí – OPE (provozní stav)
(přetlak + gravitace + trvalé mech. zatížení + teplotní dilatace)

Z důvodů neuvažování cyklického zatížení byla provedena kategorizace napětí pouze pro zkušební a provozní podmínky. Pro vyhodnocení napětí je rozhodující kolik procent využívá nejzatíženější element ze své dovolené hodnoty stanovené normou. Podle tohoto údaje se hodnotí přijatelnost celého modelu.



Obr. 7.5: Označení nejzatíženějších elementů v modelu

ZKUŠEBNÍ PODMÍNKY : potrubní norma: EN -13480

| | | | |
|----------------------------|------|--------------------|--------|
| Součinitel využití napětí: | 11,3 | element | 1070 |
| Redukované napětí: | 30,6 | dovolená hodnota : | 270,73 |
| Axiální napětí: | 5,7 | element | 108 |
| Ohybové napětí: | 37,5 | element | 1110 |
| Kroutící napětí: | 3,8 | element | 1080 |
| Tangenciální napětí: | 10,9 | element | 100 |

| uzly | Axiální napětí [MPa] | Ohybové napětí [MPa] | Kroutící napětí [MPa] | Tangenciální napětí [MPa] | Redukované napětí [MPa] | Dovolené napětí [MPa] | Součinitel využití napětí [%] |
|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1060 | 2,61 | 7,55 | 1,04 | 5,56 | 9,18 | 270,73 | 3,39 |
| 1070 | 0,99 | 36,43 | -3,67 | 2,43 | 30,60 | 270,73 | 11,30 |
| | | | | | | | |
| 1070 | 1,16 | 18,12 | 3,79 | 2,43 | 20,78 | 270,73 | 7,68 |
| 1080 | 1,16 | 28,14 | -3,79 | 2,43 | 23,66 | 270,73 | 8,74 |

PROVOZNÍ PODMÍNKY: potrubní norma: EN -13480

| | | | |
|----------------------------|-------|--------------------|--------|
| Součinitel využití napětí: | 93,94 | element | 80 |
| Redukované napětí: | 133,8 | dovolená hodnota : | 142,45 |
| Axiální napětí: | 1,9 | element | 820 |
| Ohybové napětí: | 126,1 | element | 80 |
| Kroutící napětí: | 25,7 | element | 360 |
| Tangenciální napětí: | 0,0 | element | 20 |

| uzly | Axiální napětí [MPa] | Ohybové napětí [MPa] | Kroutící napětí [MPa] | Tangenciální napětí [MPa] | Redukované napětí [MPa] | Dovolené napětí [MPa] | Součinitel využití napětí [%] |
|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 70 | 0,49 | 9,62 | -5,48 | 0,00 | 14,59 | 142,45 | 10,24 |
| 80 | 0,49 | 126,08 | 5,48 | 0,00 | 129,25 | 142,45 | 90,73 |
| | | | | | | | |
| 80 | 1,71 | 113,33 | -13,74 | 0,00 | 133,83 | 142,45 | 93,94 |
| 90 | 1,71 | 38,82 | 13,74 | 0,00 | 47,56 | 142,45 | 33,4 |

Tab. 7.1: Vyhodnocení napěťové analýzy v programu Caesar

Z vyhodnocení napětí je patrné, že zatížení modelu se vždy nachází v dovolené oblasti. Při zkoušce dosahuje součinitel využití napětí pouze 11 %. V provozních podmínkách je součinitel využití napětí v nejzatíženějším úseku 94 %. Tato hodnota je dosti blízká maximálnímu zatížení, přesto se však nachází v dovolené oblasti. Pevnostní výpočet je tedy vyhovující.

7.7 Vyhodnocení silových a momentových účinků na místa spojení potrubí

V potrubním modelu budou oproti výpočtu v programu ANSYS vyhodnoceny pouze silové a momentové účinky na místa spojení potrubních větví s destilační kolonou. Model vařáku je k potrubní technologii pružně uchycen a přizpůsobuje se dané poloze potrubního systému. Z toho vyplývá, že místa hrdel nejsou namáhány takovými silami, jaké se nacházely v případě pevného ukotvení vařáku v předchozím výpočtu. Proto tyto místa nepotřebují detailnější analýzu a nebudou zde vyhodnoceny.

V tab. 7.2 jsou znázorněny hodnoty silových a momentových účinků na uvažované hrdla destilační kolony. Tyto hodnoty jsou zjištěny v programu a následně porovnány s dovolenými stavy, jež jsou vypsány v tab. 7.3. Dovolené hodnoty zatížení hrdel kolony jsou stejné, jako v případě vyhodnocení v programu ANSYS.

| | <i>hrdlo N4</i> | <i>hrdlo N5</i> |
|----------|-----------------|-----------------|
| Fx [N] | -274 | -116,5 |
| Fy [N] | -701 | 178 |
| Fz [N] | -5294 | -265 |
| Mx [N·m] | 3963 | 147,5 |
| My [N·m] | 4701 | 169,5 |
| Mz [N·m] | -1336 | 188,5 |

Tab. 7.2: Silové a momentové účinky na hrdla kolony N4, N5

| | Fx [N] | Fy [N] | Fz [N] | Mx [N·m] | My [N·m] | Mz [N·m] |
|----------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| hrdlo N4 | 12000 | 9000 | 12000 | 9000 | 6000 | 7800 |
| hrdlo N5 | 4800 | 3600 | 4800 | 1440 | 960 | 1248 |

Tab. 7.3: Dovolené silové a momentové účinky na hrdla kolony N4, N5

Z porovnání tabulkových hodnot silových a momentových účinků na místa spojení je patrné, že vzniklé účinky od statického zatížení jsou oproti maximálním hodnotám relativně malé. Je to způsobené především pružným uchycením vařáku, který tak nezpůsobuje přídavné zatížení modelu a dobrými mechanickými vlastnostmi materiálu.

Rozdíl v dovolených hodnotách pro jednotlivé hrdla názorně ukazuje vliv průměru hrdla na výpočet těchto parametrů. Pro statické zatížení se tedy prokázala potřebná pevnostní charakteristika daných spojů.

8 NÁVRH POTRUBNÍ SÍTĚ

Návrh potrubní sítě je komplexní a složitá problematika, která bývá v praxi ovlivněna řadou důležitých aspektů. Hlavním úkolem kontrolního výpočtu je ověření správného návržení systému při daných pracovních podmínkách. V oblasti kontrolního výpočtu se tedy provádí úpravy pouze těch částí modelu, které nevyhoví daným zátěžným parametrům. Z předchozích pevnostních výpočtů napětově-deformační analýzy celého modelu i jednotlivých potrubních větví je však zřejmé, že potrubní síť je dobře navržena z hlediska provozních i zkušebních podmínek. To je způsobené především vhodnou návrhovou geometrií a relativně nízkými hodnotami uvažovaných zatížení. Pro návrh řešení potrubní sítě technologické jednotky tedy připadá v úvahu pouze změna systému zavěšení a podpěr potrubí.

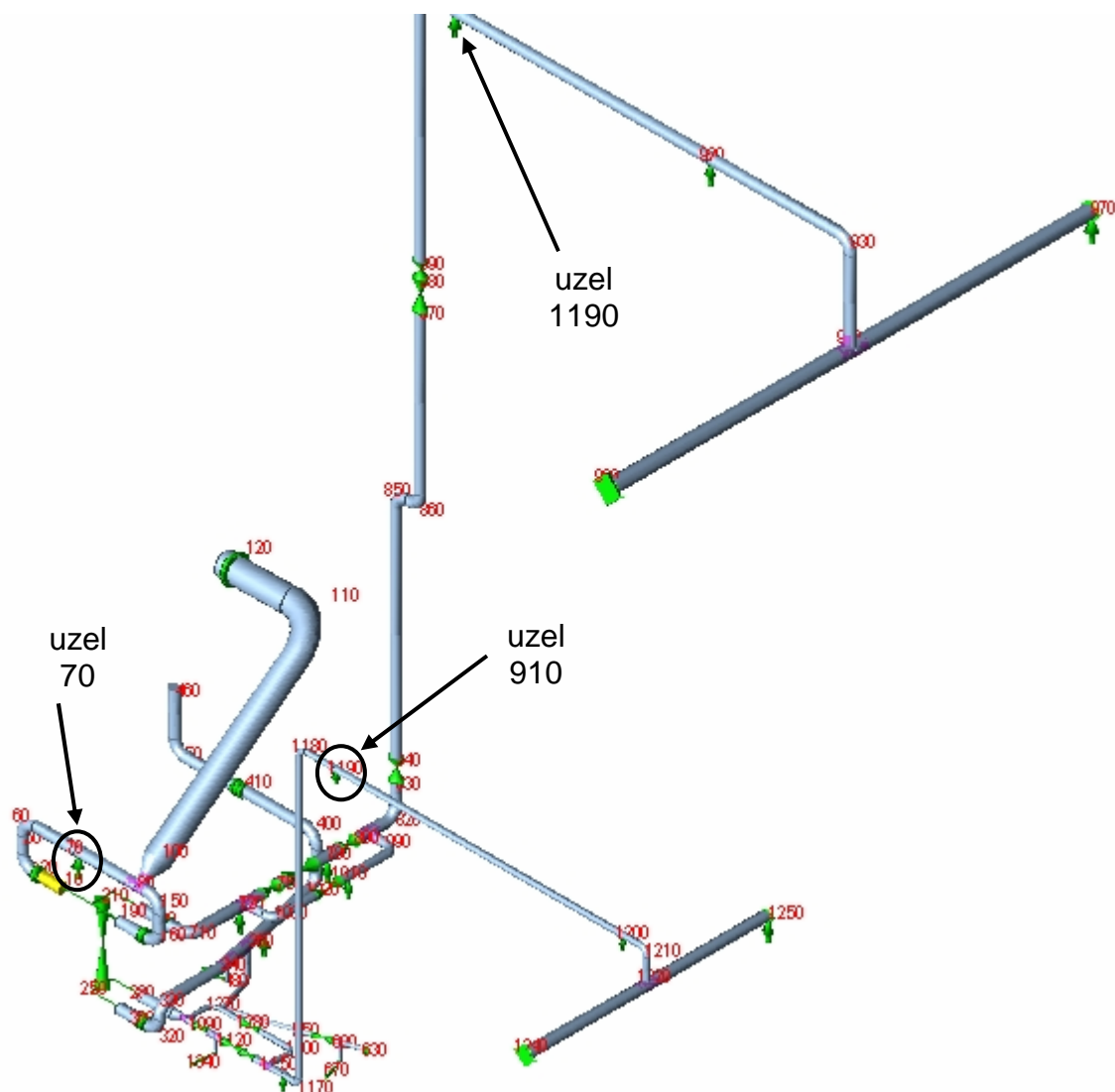
Potrubní uchycení tvoří neodmyslitelnou součást každého systému. Dosavadní výpočet prozatím uvažoval pouze uložení pomocí podpěr v ose z, což z hlediska zatížení, jak je patrné z tab. 8.1, nebylo vždy optimální řešení. Technologické jednotky většinou potřebují pružný systém podpěr, který se přizpůsobí dané provozní situaci. Z tohoto důvodu se v praxi nejčastěji setkáváme s kombinací různých typů uložení, které jsou nejvhodnější pro danou oblast. Volbu nejvhodnějšího uložení musí navrhnout projektant a měla by vždy co možná nejlépe řešit daný případ.

8.1 Uvažované místa změny uložení

V programu Caesar byly zjištěny jednotlivé účinky potrubní sítě na zadané uložení modelu. Z kompletního vyhodnocení silových účinků bylo zjištěno, že některé podpěry (závěsy), viz obr. 8.1, neplní svojí funkci při provozním zatížení ($F_z = 0$). Z důvodu teplotní roztažnosti materiálů dochází k nadlehčení potrubí a uvažované podpěry tak ztrácí svojí funkci. Tyto podpěry je zapotřebí nahradit vhodným pružinovým závěsem tak, aby docházelo k účinné eliminaci veškerých účinků na potrubní síť.

| uzel | zatížení | Fx [N] | Fy [N] | Fz [N] | Dx [mm] | Dy [mm] | Dz [mm] |
|------|---------------|--------|--------|--------------|---------|---------|---------------|
| 70 | provozní stav | 0 | 0 | 0 | 0,591 | 4,794 | 1,071 |
| | studený stav | 0 | 0 | -716 | -0,384 | 0,376 | -0,000 |
| | maximum | | | -716 | 0,591 | 4,794 | 1,071 |
| 910 | provozní stav | 0 | 0 | 0 | -5,624 | 11,246 | 8,003 |
| | studený stav | 0 | 0 | -2049 | 0,301 | 3,046 | -0,000 |
| | maximum | | | -2049 | -5,624 | 11,246 | 8,003 |
| 1190 | provozní stav | 0 | 0 | 0 | -3,229 | 5,083 | 2,399 |
| | studený stav | 0 | 0 | -421 | 0,007 | 0,611 | -0,000 |
| | maximum | | | -421 | -3,229 | 5,083 | 2,399 |

Tab. 8.1: Výsledné účinky potrubí na vybrané podpěry



Obr. 8.1: Označení nefunkčních podpěr modelu vařáku

8.2 Návrh pružných závěsů

Pružný závěs se nastavuje dle tzv. studeného stavu; to je takový stav, který odpovídá nulové odchylce pružiny při uvažování veškeré působící zátěže za normální teploty. Hlavní parametry ovlivňující volbu pružiny jsou velikost zátěžné síly (F_z) a velikost dilatačního posuvu aparátu (D_z) zjištěných z původního stavu. Ostatní hodnoty posuvu se prozatím na výběru pružiny nepodílí. Na základě těchto dvou parametrů navrhne optimální pružinový závěs pro dané místo. Veškeré pružinové závěsy jsou voleny z katalogu firmy GRADIOR.

Princip volby pružiny spočívá v nalezení optimální velikosti její tuhosti, předpětí a pracovního rozsahu. Ty se určují z parametru jmenovitého zatížení a pracovního zdvihu pružiny. Jmenovité zatížení se musí vždy nacházet v intervalu pracovní charakteristiky pružiny. Zdvih se zpravidla volí s rezervou buď k oběma koncovým polohám pružinové klece nebo pouze k předpokládaného pohybu pružiny [22]. Pracovní zdvih pružin se volí 50 mm u posuvu do 6 mm. Pro větší posuvy zařízení se uvažují hodnoty 100 nebo 150 mm.

Volba tuhosti pružiny pro uzel 70 je znázorněna v tab. 8.2. V tomto případě dochází k velkému rozdílu hodnot zatížení v původním a nově navrženém stavu, a tak je pružinová závislost stanovena s ohledem na zatížení již upraveného modelu (viz tab. 8.4). Stejným způsobem jsou navrženy parametry pružin pro uzly 910 a 1190. U těchto míst se již hodnoty zatížení v původním a navrženém stavu tolik neliší, a tak odpovídají původnímu návrhu. Výsledné parametry pružin použitých v nové návrhové koncepci jsou pak vypsány v tab. 8.3.

| Pracovní zdvih | | | Velikost pružiny | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----|-----|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 50 | 100 | 200 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| mm | mm | mm | Zatížení kN | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0,20 | 0,40 | 0,77 | 1,33 | 2,33 | 4,0 | 7,0 | 12,0 | 17,0 | 21,0 | 28,0 | 36,0 |
| 2,5 | 5 | 10 | 0,22 | 0,44 | 0,84 | 1,47 | 2,57 | 4,4 | 7,7 | 13,2 | 18,7 | 23,1 | 30,8 | 39,6 |
| 5 | 10 | 20 | 0,24 | 0,48 | 0,92 | 1,60 | 2,80 | 4,8 | 8,4 | 14,4 | 20,4 | 25,2 | 33,6 | 43,2 |
| 7,5 | 15 | 30 | 0,26 | 0,52 | 1,00 | 1,73 | 3,03 | 5,2 | 9,1 | 15,6 | 22,1 | 27,3 | 36,4 | 46,8 |
| 10 | 20 | 40 | 0,28 | 0,56 | 1,07 | 1,87 | 3,27 | 5,6 | 9,8 | 16,8 | 23,80 | 29,40 | 39,20 | 50,4 |
| 12,5 | 25 | 50 | 0,30 | 0,60 | 1,15 | 2,00 | 3,50 | 6,0 | 10,5 | 18,0 | 25,5 | 31,5 | 42,0 | 54,0 |
| 15 | 30 | 60 | 0,32 | 0,64 | 1,23 | 2,13 | 3,73 | 6,4 | 11,2 | 19,2 | 27,2 | 33,6 | 44,8 | 57,6 |
| 17,5 | 35 | 70 | 0,34 | 0,68 | 1,30 | 2,27 | 3,97 | 6,8 | 11,9 | 20,4 | 28,9 | 35,7 | 47,6 | 61,2 |
| 20 | 40 | 80 | 0,36 | 0,72 | 1,38 | 2,40 | 4,20 | 7,2 | 12,6 | 21,6 | 30,60 | 37,80 | 50,40 | 64,8 |
| 22,5 | 45 | 90 | 0,38 | 0,76 | 1,46 | 2,53 | 4,43 | 7,6 | 13,3 | 22,8 | 32,3 | 39,9 | 53,2 | 68,4 |
| 25 | 50 | 100 | 0,40 | 0,80 | 1,53 | 2,67 | 4,67 | 8,0 | 14,0 | 24,0 | 34,0 | 42,0 | 56,0 | 72,0 |
| 27,5 | 55 | 110 | 0,42 | 0,84 | 1,61 | 2,80 | 4,90 | 8,4 | 14,7 | 25,2 | 35,7 | 44,1 | 58,8 | 75,6 |
| 30 | 60 | 120 | 0,44 | 0,88 | 1,69 | 2,93 | 5,13 | 8,8 | 15,4 | 26,4 | 37,40 | 46,20 | 61,60 | 79,2 |
| 32,5 | 65 | 130 | 0,46 | 0,92 | 1,76 | 3,07 | 5,37 | 9,2 | 16,1 | 27,6 | 39,1 | 48,3 | 64,4 | 82,8 |
| 35 | 70 | 140 | 0,48 | 0,96 | 1,84 | 3,20 | 5,60 | 9,6 | 16,8 | 28,8 | 40,8 | 50,4 | 67,2 | 86,4 |
| 37,5 | 75 | 150 | 0,50 | 1,00 | 1,92 | 3,33 | 5,83 | 10,0 | 17,5 | 30,0 | 42,5 | 52,5 | 70,0 | 90,0 |
| 40 | 80 | 160 | 0,52 | 1,04 | 1,99 | 3,47 | 6,07 | 10,4 | 18,2 | 31,2 | 44,20 | 54,60 | 72,80 | 93,6 |
| 42,5 | 85 | 170 | 0,54 | 1,08 | 2,07 | 3,60 | 6,30 | 10,8 | 18,9 | 32,4 | 45,9 | 56,7 | 75,6 | 97,2 |
| 45 | 90 | 180 | 0,56 | 1,12 | 2,15 | 3,73 | 6,53 | 11,2 | 19,6 | 33,6 | 47,6 | 58,8 | 78,4 | 100,8 |
| 47,5 | 95 | 190 | 0,58 | 1,16 | 2,22 | 3,87 | 6,77 | 11,6 | 20,3 | 34,8 | 49,3 | 60,9 | 81,2 | 104,4 |
| 50 | 100 | 200 | 0,6 | 1,2 | 2,3 | 4,0 | 7,0 | 12,0 | 21,0 | 36,0 | 51,0 | 63,0 | 84,0 | 108,0 |
| Třída únosnosti | | | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 |
| | | | Tuhost pružiny (N/mm) | | | | | | | | | | | |
| | | | 2,0 | 4,0 | 7,7 | 13,3 | 23,3 | 40 | 70 | 120 | 170 | 210 | - | - |
| | | | 4,0 | 8,0 | 15,3 | 26,7 | 46,7 | 80 | 140 | 240 | 340 | 420 | 560 | 720 |
| | | | 8,0 | 16,0 | 30,7 | 53,3 | 93,3 | 160 | 280 | 480 | 680 | 840 | 1120 | 1440 |

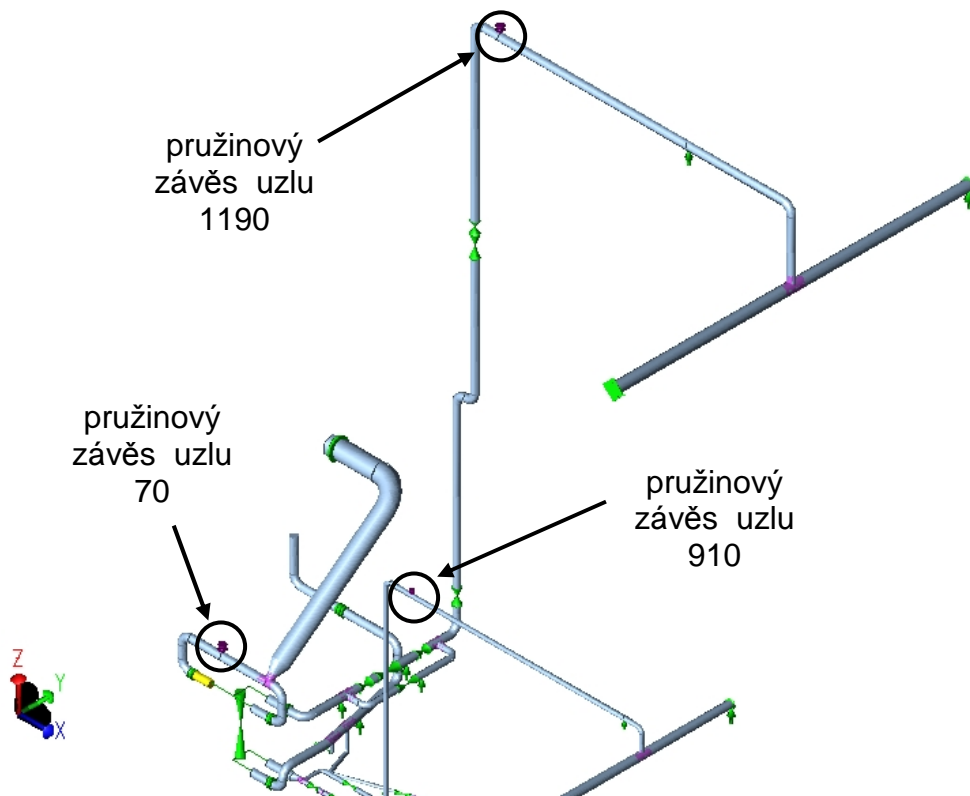
Tab. 8.2: Katalog pružinových závěsů firmy GRADIOR [22]

| uzel | 70 | 910 | 1190 |
|--------------------|------|------|------|
| zatížení [kN] | 0,77 | 2,07 | 0,42 |
| zdvih pružiny [mm] | 50 | 100 | 50 |
| tuhost [N/mm] | 30,7 | 15,3 | 8 |

Tab. 8.3: Výsledné parametry pružin pro jednotlivé uzly modelu

8.3 Navržená potrubní síť

V modelu byly navrženy změny v uložení potrubního systému. Nevyhovující podpěry se nahradily vhodnými pružinovými závěsy, které se následně začlenily do modelu vařáku, viz obr. 8.2.



Obr. 8.2: Upravený model potrubní sítě

Pro ověření navržených úprav byl proveden nový výpočet zátěžných účinků. Ze zjištěných údajů, které jsou zobrazeny v tab. 8.4 je patrné, že pružné závěsy jsou dobře navrženy pro dané provozní podmínky. Hodnoty zatížení i zdvihu se ve všech případech nachází v intervalu přípustných hodnot. Pružinové závěsy tedy budou efektivně pracovat v provozním režimu.

Vliv posuvů D_x a D_y byl v těchto případech zanedbán. Pružinový závěs vždy umožňuje menší posuv do směru x , y , který by však neměl překročit úhel řádově 4° . Po přepočítání veškerých vychylek (D_x , D_y) k celkové délce táhla, jež jsou specifikované v potrubních kusovnících se maximální hodnota vychýlení vždy pohybuje pod úhlem 1° . Z tohoto důvodu byly navrženy pružinové závěsy ponechány. Při větších odchylkách od svislého směru by bylo potřeba tyto parametry zohlednit a nově navrhnout pružinový závěs.

Pro praktickou aplikaci těchto úprav do skutečného provozu by bylo dále zapotřebí specifikovat připojení závěsu na nosnou konstrukci, spojovací části jednotlivých úseků, uchycení táhel závěsů, pružinovou klec, montáž a seřízení sestavy nebo povrchovou úpravu daných částí. K volbě vyjmenovaných faktorů se používá katalogových podkladů, jenž jsou doplněny o zkušenosti projektanta nebo firemní specializaci. V práci se však tyto aspekty již nespecifikovaly.

| uzel | zatížení | Fx [N] | Fy [N] | Fz [N] | Dx [mm] | Dy [mm] | Dz [mm] |
|------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 70 | provozní stav | 0 | 0 | -1417 | -0,023 | 4,838 | 1,565 |
| | studený stav | 0 | 0 | -1480 | -0,356 | 0,267 | 0,210 |
| | maximum | | | -1480 | -0,380 | 4,838 | 1,565 |
| 910 | provozní stav | 0 | 0 | -1900 | -5,544 | 8,429 | 11,107 |
| | studený stav | 0 | 0 | -2070 | 0,295 | 3,006 | 0,016 |
| | maximum | | | -2070 | -5,544 | 8,429 | 11,107 |
| 1190 | provozní stav | 0 | 0 | -394 | -3,257 | 5,039 | 3,209 |
| | studený stav | 0 | 0 | -420 | 0,007 | 0,716 | 0,002 |
| | maximum | | | -420 | -3,257 | 5,039 | 3,209 |

Tab. 8.4: Charakteristika pružinového závěsu v modelu vařáku

Navržené změny v modelu vařáku zajistily správnou funkci celého systému uložení a podpěr. Kombinace pružného a pevného uložení zaručí neustálou podporu potrubního systému. Rovněž se tato změna kladně projevila ve vyhodnocení napjatosti, kde se v případě provozního zatížení snížilo napětí nejzatíženějšího elementu (element 80) skoro o 5 %.

Správně navržené uložení představuje i z hlediska spolehlivosti důležitý prvek, který přímo ovlivňuje funkci celku a jeho životnost. Z hlediska těchto dvou aspektů je daný systém dobře nastavený na předpokládané statické zatížení a není již potřeba dalších úprav.

9 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá kontrolním pevnostním výpočtem průmyslového potrubí procesní jednotky. Výpočet byl proveden pomocí vhodných MKP programů, kterými byly zjištěny napěťově-deformační účinky zatížených částí.

Na základě pevnostního výpočtu byla zjištěna kritická místa, v kterých se nacházela lokální napětí. Po vyhodnocení těchto úseků potrubí v obou programech však bylo zjištěno, že dané statické zatížení se vždy nachází v dovolené oblasti, kterou udává norma ČSN EN 13480. To vypovídá o kvalitně navržené a dostatečně dimenzované konstrukci, která je již využívána v konkrétním chemickém provozu.

Z porovnání hodnot obou pevnostních analýz je patrné, že dosažené výsledky jsou dosti podobné, přestože každý výpočet vycházel z jiného modelu. To ukazuje na podobnou výpočetní koncepci obou MKP programů, ale také na vysokou přesnost numerických výpočtů a kvalitně zadaných okrajových podmínek. Z tohoto poznatku lze usuzovat o objektivnosti kontrolního výpočtu.

Oba výpočtové modely jsou zpracovány se snahou o maximální srozumitelnost a přehlednost. Výpočet v programu ANSYS je zpracován podle praktického postupu, který může být aplikován i na ostatní případy podobného typu. Pevnostní výpočet v programu Caesar zase naznačuje, jak se řeší komplikované potrubní sestavy v praxi.

Pevnostní výpočty prokázaly, že daný potrubní systém nevyžaduje žádné podstatné úpravy. Jediný nedostatek modelu vařáku byl zjištěn v nesprávně navržených podpěrách potrubí. Jako nejvhodnější náhrada těchto nefunkčních podpěr byla zvolena varianta použití pružinových závěsů. Na základě praktických doporučení byly vybrány parametry pružin, které se následně začlenily do modelu. Pomocí této úpravy došlo ke snížení napjatosti v potrubním modelu, což vede k prodloužení životnosti provozovaného systému.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WILDA,V., a KOLEKTIV AUTORŮ: Projektování průmyslových potrubí a potrubních rozvodů, 1.vydání, Vydalo SNTL-Nakladatelství technické literatury Praha 1, Praha, 1968, 240 s.
- [2] ČSN EN 13480-3: Kovová průmyslová potrubí-část 3: Konstrukce a výpočet. Praha: Český normalizační institut, 2003. 226 s.
- [3] KŘUPKA,V.: Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí, Vydalo SNTL-Nakladatelství technické literatury Praha, 1967, 248 s.
- [4] ZUNA,P., MACEK,K., a KOLEKTIV AUTORŮ: Nauka o materiálu, Vydalo vydavatelství ČVUT Praha 6, 1996. 209 s. ISBN 80-01-01507-6.
- [5] POSPÍCHAL,J.: Technické kreslení, Vydalo vydavatelství ČVUT Praha 6, 2003. 84 s. ISBN 80-01-02196-3.
- [6] MKP a programový systém: Vybrané úlohy z analýzy teplotních polí [online], 2005, poslední úprava 10. 11. 2005. [cit. 29. března 2010]. Dostupné z <http://oei.fme.vutbr.cz/ANSYS/index_ansys.html>
- [7] Metoda konečných prvků [online], 2010, poslední úprava 17. 9. 2005. [cit. 29. března 2010]. Dostupné na <<http://umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/MKP4.doc>>.
- [8] FEM/MKP – Základy použití metody konečných prvků pro technické výpočty v programu Autodesk Inventor Professional [online]. Trutnov: 2006. Zveřejněno dne: říjen 2006. [cit. 29. března 2010]. Dostupné na <<http://www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/.../skripta-fem-mkp.pdf>>.
- [9] ANSYS Workbench moduly – SVS FEM [online]. citované 29. března 2010. Dostupné na <<http://www.svsfem.cz/index.php/public/page.php?pgid=97>>.
- [10] Úvod a přehled značení ocelí a litin [online], citováno 12. března 2010.Dostupné na <<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/6ms%5Cprednasky%5CENORM.doc>>.
- [11] TERAPOL nerez ocel - Vlastnosti a použití [online], citováno 12. března 2010.Dostupné na <[http:// www.terapol.cz/vlastnostiapouziti.php](http://www.terapol.cz/vlastnostiapouziti.php)>.
- [12] KOLEKTIV AUTORŮ: Materiály a jejich svařitelnost. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů, 1.vyd. Vydalo nakladatelství ZEROSS v Ostravě v edici Svařování, Ostrava, leden 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [13] KOLEKTIV AUTORŮ: Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů, 1.vyd., Vydalo nakladatelství ZEROSS v Ostravě v edici Svařování, Ostrava, listopad 1999, 249 s. ISBN 80-85771-70-5.

- [14] KOLEKTIV AUTORŮ: Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů, 1.vyd. Vydalo nakladatelství ZEROSS v Ostravě v edici Svařování, Ostrava, únor 2000, 213 s. ISBN 80-85771-72-1.
- [15] MIKULA,J., a KOLEKTIV AUTORŮ: Potrubí a armatury, 1.vydání, Vydalo SNTL-Nakladatelství technické literatury Praha 1, Praha, 1974, 588 s.
- [16] Základy procesního inženýrství [online], 2009, poslední úprava 14. 9. 2009. [cit. 23. dubna 2010]. Dostupné na <<http://homen.vsb.cz/~wih15/Proclng/>>.
- [17] PIA Systems Corporation: Pipeline management & Deal origination [online], 2008. [cit. 29. dubna 2010]. Dostupné na <<http://www.piasystems.com/Pipeline.jpg>>.
- [18] ARMAT spol. s.r.o: Nerezové oceli [online], 2008. [cit. 29. dubna 2010]. Dostupné na <<http://www.armat.cz/picture/main/polozky-pouzite-materialy.jpg>>.
- [19] MĚD portál: Svařování měděné trubky [online], 2007. [citované 29. dubna 2010]. Dostupné na <http://www.medportal.cz/files/image/tartalom/rezcsoszereles/kotestechnika/rezcsoszereles_hegesztes.jpg>.
- [20] COADE: Intergraph CAESAR II [online], 2010. [citované 30. dubna 2010]. Dostupné na <<http://www.coade.com/products/caesarii>>.
- [21] KINETICS Noise Control: [online], 2010. [citované 30. dubna 2010]. Dostupné na <<http://www.kineticsnoise.com/hvac/images/srh.jpg>>.
- [22] GRADIOR POWER s.r.o: Produkty [online], 2010, poslední úprava 13. dubna. 2010. [citované 12. května 2010]. Dostupné na: <http://www.gradior.cz/content/power/cs/katalog_cz/grad_katal_cz.pdf>.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 technická dokumentace potrubních výkresů

Příloha 2 kusovníky potrubních sítí

1 CD – elektronická verze diplomové práce